Die physikalischen Grundlagen des intermittierenden Kohlensäuresprudels zu Namedy bei Andernach a. Rh.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Marburg

vorgelegt von

Emil Altfeld
aus Unna i. Westf.

Marburg i. Hessen
Chr. Schaaf, Spezialdruckerei für Dissertationen
1913

Von der Philosophischen Fakultät als Dissertation angenommen
am 10. Februar 1913.
Berichterstatter: Prof. Dr. F. Richarz.

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556030_0042

Inhalts-Übersicht.

Einleitung.

§ 1. Allgemeines über Mineralquellen . . . . . Seite 7
§ 2. Geschichte des Namedy-Sprudels . . . . . „ 13

Grundlagen der Untersuchung.

§ 3. Die eigenen Messungen am Namedysprudel vom 21. Dezember 1911, 12. bis 15. März, 29. Mai und 16. und 17. August 1912 „ 18

Ältere Erklärungsversuche.

§ 4. Die Erklärung intermittierender Sprudel von Pictet und Andreae . . . . . „ 37
§ 5. Konstruktion eines Apparates nach Pictet und Andreae . . „ 38
§ 6. Kritik ihrer Theorie . . . . . , 39
§ 7. Die Theorie des Namedysprudels von F. Henrich, Wiesbaden . . . . . „ 40
§ 8. Versuche einer experimentellen Kontrolle dieser Theorie; Ergebnisse . . . . . „ 42
§ 9. Kritik der Henrichschen Theorie . . . . . „ 47

Eigene Erklärung.

§ 10. Theorie des Namedysprudels auf Grund der Messungen vom 21. Dezember 1911, 12. bis 15. März, 29. Mai 1912 . . . . . „ 53
§ 11. Experimentelle Bestätigung der Theorie . . . . . „ 57
§ 12. Endgültige Theorie des Namedysprudels auf Grund der Messungen vom 16. und 17. August 1912 . . . . . „ 66
§ 13. Experimentelle Darstellung der Theorie; Demonstrationsapparat eines intermittierenden Kohlensäuresprudels . . . „ 72
§ 14. Zusammenfassung . . . . . „ 75

Anhang.

§ 15. Anwendung der Theorie auf andere Sprudel . . . . . Seite 77
1. Ránk-Herlein bei Kaschau . . . . . „ 77
2. Vichy a. Allier . . . . . „ 81
3. Montrond (Loire) . . . . . „ 83
4. Neuenahr . . . . . „ 85
5. Kissingen . . . . . „ 86
6. Tönistein bei Brohl a. Rh. . . . . „ 87
7. Bellthal a. d. Mosel . . . . . „ 87
8. Aïn-Oumach . . . . . „ 88
9. Der Kane-Geysir (Westpennsylvanien) . . . . . „ 88

Einleitung.

§ 1. Allgemeines über Mineralquellen.

Überblickt man die große Zahl der Mineralquellen, die speziell auf deutschem Boden zu finden sind, so erscheinen sie auf den ersten Blick regellos verteilt; doch bei näherem Zusehen ergeben sich insofern bald Abhängigkeiten der einzelnen Quellen von dem geologischen Aufbau des Untergrundes, aus dem sie entspringen, als sie vor allem „an die Stätten ehemaliger vulkanischer Tätigkeit und an Stellen der Erdoberfläche gebunden erscheinen, an denen große tiefgehende Verwerfungen und Spalten vorhanden sind“ [1]). Da eine Mineralquelle sich von einer gewöhnlichen Süßwasserquelle vor allem durch ihren Salz- und Gasgehalt, manchmal auch durch ihre Temperatur und eine außergewöhnliche Steigkraft unterscheidet, die ihr nach den geologischen Verhältnissen der Umgebung eigentlich nicht zukommt, so erhebt sich natürlich sofort die Frage nach der Ursache dieser Unterscheidungsmerkmale, nicht weniger aber auch danach, ob das Wasser einer solchen Mineralquelle von dem einer gewöhnlichen Quelle prinzipiell verschieden ist.

Was zunächst die letztere Frage betrifft, so ist sicherlich richtig, daß es sich bei der weitaus größten Zahl von Mineralquellen ebenfalls um „vadoses“ Wasser handelt; darunter versteht man nach E. Sueß solches Wasser, das dem großen Kreislaufe in der Atmosphäre und Lithosphäre angehört. Es ist also Regenwasser, das durch die durchlässigen Schichten

1) Delkeskamp, Fortschritte auf dem Gebiete der Erforschung der Mineralquellen. Zeitschr. f. prakt. Geologie, 16. Jahrg., pag. 407. 1908.

der Erdoberfläche in die Tiefe sickert, bis es auf eine undurchlässige Schicht kommt. So bildet sich entweder eine absteigende (Spalt-, Schicht- oder Überfalls-) Quelle, oder eine aufsteigende Quelle, als deren Hauptvertreter die Verwerfungsquellen zu gelten haben[1]). Wenn nun das Süßwasser auf seinen vielfach verschlungenen Wegen durch das Gestein leicht angreifbare Schichten vorfindet und gar mit Kohlensäure in Berührung kommt, die in den Gesteinsspalten zirkuliert, dann sind die Bedingungen zur Bildung einer Mineralquelle aus vadosem Wasser gegeben. Diese Erklärung scheint aber für einige Quellen, vor allem für die Karlsbader keine Geltung zu haben, da bei diesen die Menge des gelieferten Wassers in keinem Verhältnis zur Niederschlagsmenge der Umgebung steht. Daher nahm Sueß aus diesem und aus anderen Gründen an, daß ein Teil des Mineralwassers als „juvenil" zu betrachten ist. Er versteht darunter solches Wasser, das zum ersten Male aus dem magmatischen Erdinnern an die Oberfläche tritt. So bestechend auch diese Vorstellung ist, so scheint es doch, als ob „die Beteiligung juvenilen Wassers an der Zusammensetzung unserer Quellen lange nicht so groß ist, wie man ursprünglich unter dem ersten Eindruck dieser neu eingeführten Begriffe annahm"[2]). Was die speziell beim Namedysprudel vorliegenden Verhältnisse anlangt, so kann man mit Sicherheit dahin entscheiden, daß es sich bei ihm auf keinen Fall um rein juveniles Wasser handelt, da eine Abhängigkeit des Quellwasserstandes vom Rhein- und damit auch in genügender Annäherung vom Grundwasserstand[3]) als erwiesen betrachtet werden muß, trotzdem eine direkte Einwirkung des Grundwassers auf das Mineralwasser durch eine entsprechend tief gehende Abdichtung verhindert ist. Meiner Ansicht nach ist das Namedywasser lediglich vadosen Ursprungs, wie es höchst wahrscheinlich auch bei allen anderen Mineralquellen des rheinischen Schiefergebirges der Fall ist.

Auch bei der Frage nach der Herkunft der Gase, wie Kohlensäure, Schwefelwasserstoff, Kohlenwasserstoffe und Stick-

1) vergl. z. B. Em. Kayser, Allgem. Geologie III, pag. 303. 1909.

2) E. Kaiser, Die Mineralquellen des rheinischen Schiefergebirges. Allgem. Deutsche Bäderztg. VI, Nr. 23—25. 1909.

3) vergl. dazu Em. Kayser loc. cit. p. 300.

stoff haben die Sueßschen Anschauungen von dem Einfluß des magmatischen Erdinnern auf die Erscheinungen an der Oberfläche eine große Rolle gespielt, anscheinend mit mehr Berechtigung und Erfolg als beim Wasser. Da alle diese Gase in vulkanischen Ausströmungen festgestellt sind, so kann man mit ziemlicher Sicherheit von ihnen annehmen, daß sie meist juveniler Natur sind. Speziell muß man die Kohlensäureausströmungen als letzten Nachhall vulkanischer Tätigkeit ansehen. Ein ausgezeichnetes Beispiel dafür ist die Umgebung des nur wenige Kilometer vom Namedysprudel entfernten Laacher Sees, wie auch das benachbarte Brohlthal, wo die Aushauchungen aus einem einzigen Bohrloch täglich rund 2½ Millionen Liter betragen sollen. Allerdings soll nicht unerwähnt bleiben, daß die Verhältnisse häufig nicht so einfach liegen, wie es auch Delkeskamp in einer ausführlichen Arbeit gezeigt hat[1]).

Was nun den Salzgehalt einer Mineralquelle anlangt, so kann man den Satz aufstellen, daß dieser im allgemeinen abhängig ist von den Schichten, die das Wasser durchsickert hat. So wird eine Quelle, die aus den Kochsalzlagern des Zechsteins oder der Trias stammt, vorwiegend Sole liefern, während die obereozänen Tegelschichten bei Hunyadi-Janos vermöge ihres Gehaltes an Dolomitstaub, Eisenkies und Gips infolge chemischer Umsetzung zur Bildung des bekannten Bitterwassers Veranlassung geben. Speziell ist für den Alkali-, Calcium- und Kochsalzgehalt derjenigen Quellen des rheinischen Schiefergebirges, die aus dem Unterdevon stammen, also auch für den Namedysprudel, nach Kaiser[2]) folgende Entstehung anzunehmen:

1. Der Alkaligehalt ..... entstammt dem Kaolinisierungsvorgang der Grauwacken und anderer primär Feldspat führender Gesteine.

2. Das Kalzium ..... rührt aus kalkigen Beimengungen der Grauwacken oder aus eingeschalteten Kalklagern her.

3. Der Kochsalzgehalt der Quellen im rheinischen Schiefergebirge ist noch wenig erklärt. Er kann vielleicht auf die Auslaugung salzhaltiger Tonschiefer zurückgeführt werden.

---

1) Delkeskamp, Vadose und juvenile Kohlensäure. Ztschr. f. prakt. Geol. XIV. 1906, Heft 2.

2) E. Kaiser loc. cit.

Manche Mineralquellen zeichnen sich aber nicht nur durch ihren Salz- und Gasgehalt, sondern auch durch eine Temperatur aus, welche die mittlere Jahrestemperatur des betreffenden Ortes überschreitet. Als Ursache dafür kommen in Betracht:

1. Die bei chemischen Umsetzungen im Mineralwasser freiwerdende Wärme.
2. Die mit der Tiefe zunehmende Erdwärme.
3. Die aus großer Tiefe aus dem magmatischen Innern aufsteigenden juvenilen Wassermassen und Gase.

Daß die Steigkraft der Mineralquellen wahrscheinlich herrührt von den in ihnen aufsteigenden Gasen, ist anscheinend schon den Alten bekannt gewesen[1]).

Daneben sind aber für ihr Zutagetreten auch Schwere und hydrostatischer Druck maßgebend. Da nun für die vorliegende Untersuchung nur künstlich erbohrte Quellen in Betracht kommen, so sollen nur die hierbei etwa auftretenden Möglichkeiten näher betrachtet werden. Die Anlage eines Bohrloches wird nur dann erfolgreich genannt werden können, wenn entweder wasserführende Schichten oder Spalten angetroffen werden, in denen sich Wasser und Gas bewegen. Bei Abwesenheit von Gasen ist das Verhalten des Wassers im Bohrloch abhängig von dem hydrostatischen Druck nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren. Ganz anders aber werden die Verhältnisse, wenn aufsteigende Gase als auftreibende Kraft hinzutreten. Dann gilt im allgemeinen das neuerdings auch von F. Henrich[2]) mathematisch behandelte Gesetz, daß z. B. die Sauerquellen durch Kohlensäure derart aufgetrieben werden, daß das in der Quellröhre frei aufsteigende Gas soviel Wasser verdrängt, als es selbst Raum einnimmt. Eine Quelle wird also auch dann überfließen, selbst wenn die aus dem hydrostatischen Druck resultierenden Bedingungen dafür nicht erfüllt sind. Aber ganz so einfach, wie Henrich annimmt, liegen die Verhältnisse doch nicht, wenn er z. B. glaubt, daß die Wirkung kleiner und großer Blasen, die den ganzen Querschnitt einer Röhre ausfüllen,

1) vergl. Haas, Quellenkunde pag. 94. 1895.

2) vergl. Henrich, Theorie der Kohlensäure führenden Quellen, begründet durch Versuche. Ztsch. f. das Berg-, Hütten- u. Salinenwesen, 50, Sonderbd. 1—5, pag. 531, 1902; und 27, 1879.

nur abhängig sei von ihrem Volumen. Es hat sich vielmehr im Laufe meiner Untersuchung gezeigt, daß nicht nur eine statische hebende Wirkung einer großen Blase vorhanden ist, sondern auch eine dynamische, insofern als sie durch ihr Aufsteigen Wasser nachzieht und so in doppelter Weise den Wasserspiegel emporhebt, vorausgesetzt natürlich, daß neues Wasser an die Stelle des emporgehobenen zuströmen kann (vergl. dazu S. 45). Überhaupt wird sich aus der vorliegenden Arbeit ergeben, daß den bis ins einzelne gehenden mathematischen Rechnungen in diesem Zweige der Naturwissenschaft immer nur ein zweifelhafter Wert zukommt, da die Grundlagen der Erscheinungen stets nur teilweise erkannt werden können, oder die zur bequemen mathematischen Behandlung notwendigen vereinfachenden Annahmen zu sehr mit der Wirklichkeit differieren, als daß man eine Übereinstimmung der theoretischen Ergebnisse mit den tatsächlichen Verhältnissen erwarten könnte; darum habe ich mit Absicht soviel wie möglich jede genauere Rechnung vermieden (vergl. auch S. 71 und 72).

Wenn nun solche durch Kohlensäure aufgetriebenen Quellen beständig ausfließen, so nennt man sie „kontinuierlich". Wird nur zu bestimmten Zeiten Wasser und Gas ausgestoßen, so spricht man von einer „intermittierenden" Quelle. Darunter wollen wir aber nicht diejenigen rechnen, die stets an das Vorkommen eines geeignet gebauten Hohlraumes im Gestein gebunden sind und meist auch nicht von Gas aufgetrieben werden. Dieser Hohlraum wird nämlich durch einen heberförmigen Ausflußkanal entleert, wenn der Wasserspiegel in ihm den höchsten Punkt des Hebers überschreitet; ist der Ausfluß weiter als der Zufluß, so muß diese Erscheinung nach einiger Zeit aufhören, bis der Hohlraum sich wieder gefüllt hat[1]).

Fragen wir nach den Grundlagen der intermittierenden Sprudel, so liegt auf der Hand, daß der hydrostatische Druck nicht die Ursache dieses periodischen Verhaltens sein kann; denn dann müßte er nur zu gewissen Zeiten wirksam sein. Er macht sich aber, wie wir sehen werden, insofern geltend, als er den Wasserspiegel zwingt, zur Zeit der Ruhe einen be-

1) Näheres bei Haas loc. cit. p. 83.

stimmten Stand einzunehmen. Denkbar wäre auch, falls die Quelle von juvenilem Wasser gespeist wird, daß die Spannkraft seines Dampfes ihre Hand im Spiele hat; wenn man sich aber vergegenwärtigt, daß manche intermittierenden Quellen kaum 100 Meter tief sind und dabei Wasser unter 15 Grad Celsius liefern, so verliert diese Möglichkeit im allgemeinen jede praktische Bedeutung. Es bliebe also nur die Wirkung des mit dem Wasser aufsteigenden oder seitlich dem Bohrloch zuströmenden Gases.

Dann muß aber eine Bedingung vorhanden sein, welche die hebende Wirkung dieses Gases — es wird sich meist um Kohlensäure handeln — nur periodisch zuläßt. Im allgemeinen sind dafür folgende Möglichkeiten:

1. Im Bohrloch befindet sich kohlensäurefreies oder wenigstens kohlensäurearmes Wasser; die aus den Spalten ständig in das Bohrloch eintretende Kohlensäure wird in der Zeit zwischen zwei Ausbrüchen, der „Zwischenzeit", vom Wasser absorbiert, und kann erst nach erfolgter Sättigung ihre hebende Kraft entfalten.

2. Im Bohrloch befindet sich kohlensäurehaltiges bezw. gesättigtes Wasser; die periodisch in das Bohrloch eintretende Kohlensäure wirkt vom ersten Augenblick des Zutrittes an hebend auf die Säule. Der Grund zu diesem periodischen Verhalten des Gases kann liegen:

a) in Hohlräumen, die eine solche Lage zum Bohrloch haben, daß sie, bei einem Ausbruch entleert, in der Zwischenzeit erst von der Kohlensäure angefüllt werden müssen, bevor diese in das Bohrloch eintreten kann;

b) in periodischen Druckschwankungen der in den Spalten des Gebirges zum Bohrloch strömenden Kohlensäure.

Diese Gesichtspunkte ergeben sich also bei der Untersuchung der physikalischen Grundlagen intermittierender Quellen oder Sprudel. Es war nun meine Aufgabe, speziell an dem Beispiel des Namedysprudels entweder bereits vorhandene Theorien auf ihre Richtigkeit zu prüfen und möglicherweise deren experimentelle Verwirklichung zu finden, oder, falls keine befriedigende Erklärung vorliegen sollte, selbst eine solche zu geben und ihre Richtigkeit durch Versuche zu beweisen.

§ 2. Geschichte des Namedysprudels.

Der Namedysprudel bei Andernach a. Rh. wurde in den Jahren 1902 und 03 auf der ca. 15 Minuten von Andernach rheinabwärts gelegenen Halbinsel „Krummes Werth“ oder „Namedy-Werth“ erbohrt. Die Veranlassung zu der Bohrung war die Beobachtung, daß in dem toten Rheinarm, der die Halbinsel von dem Rheinufer trennt, zahlreiche Gasblasen aufstiegen, die sich bei näherer Untersuchung als Kohlensäure erwiesen[1]). Das Bohrloch, das aus praktischen Gründen ungefähr in der Mitte der Halbinsel niedergestoßen wurde, durchsank Schichten von folgender Zusammensetzung:

Bis 20,75 m: Sand, grober Kies, Findlinge und Gerölle.
Bis 60 m: Harter Schiefer, Letten- und Tonschiefer mit Quarziten.
Bis 100 m: Harter Schiefer und Grauwacken mit Quarziten, Bröckel und Tonschiefer.
Bis 120 m: Quarzite und Grauwacken.
Bis 342,45 m: Harte und weiche (Ton-)schiefer, Grauwacke, Quarzite.

Zweifellos steht das ganze Bohrloch in unterdevonischen Schichten. Irgend welche Hohlräume wurden in keinem der verschiedenen Gesteine angetroffen[2]).

Zum ersten Male machten sich erhebliche Kohlensäuremengen bemerkbar in einer Tiefe von 100,65 m nach Durchbohrung einer 60 cm dicken Quarzitschicht. Mit zunehmender Tiefe wurde die Kohlensäureentwicklung immer lebhafter, bis bei 106 m, als die Sohle des Bohrloches in der Grauwacke stand, die erste Sprudelerscheinung von 7—8 Minuten Dauer auftrat, die sich in intermittierender Art und Weise täglich 4—5 mal wiederholte; die Zwischenzeit betrug also 5—6 Stunden. Hier sei gleich bemerkt, daß der Sprudel, nachdem die ersten

1) Pfeiffer, Das Mineralwasser von Namedy, p. 3. Wiesbaden 1912.

2) Diese und die nachfolgenden Mitteilungen verdanke ich dem überaus freundlichen Entgegenkommen der Namedysprudel-Direktion zu Berlin N.W., Alt-Moabit 139, und der Inspektion zu Andernach.

Verrohrungsarbeiten beendet waren, im wesentlichen diese Zwischenzeit bis zum Jahre 1908 eingehalten hat. Dieses regelmäßige Intermittieren währte volle 4 Monate, während das Bohrloch bis über 200 m Teufe getrieben wurde; längere oder kürzere Zwischenzeiten kamen nur sehr selten vor. Nachdem dann aber zwei starke Sprudelerscheinungen von 10 bezw. 30 Minuten Dauer die Regelmäßigkeit des Spieles gestört hatten, ereignete sich, als die Sohle bei 218 m Tiefe in der Grauwacke stand, ein Ausbruch von solcher Heftigkeit, daß alle früheren und späteren weit davon übertroffen wurden.

Mit diesem Ausbruch beginnt die Zeit des unregelmäßigen Erscheinens des Sprudels. Zunächst schwankt die Zwischenzeit von einem halben bis zu 2 Tagen, und die Dauer der langsam wieder schwächer werdenden Ausbrüche von 10 bis 30 Minuten. Dann erscheint der Sprudel bei 267,05 m Teufe wieder stärker und häufiger, 5mal in einem Tage, bis bei Durchstoßung stark quarzitischer Grauwackenschichten der Strahl alle 20 Minuten austritt. Gemäß der Kürze der Zwischenzeit geht auch die Dauer eines Ausbruches bis auf eine Minute herunter. 10 Tage lang springt der Sprudel in dieser Art, dann wächst die Zwischenzeit wieder auf 4 Stunden, um darauf zwischen 2 und 4 Stunden hin und her zu schwanken. Schließlich erscheint bei einer Bohrlochtiefe von 338,2 m der Sprudel 15—18mal täglich, d. h. also mit einer Zwischenzeit von ungefähr anderthalb Stunden. In dieser Art springt der Sprudel auch dann noch, als bei einer Tiefe von 343,45 m die Bohrung als gelungen betrachtet und daher eingestellt wird.

Dieses wechselnde Verhalten des Sprudels während der Bohrzeit zeigt also, daß nicht eine, sondern mehrere Kohlensäure führenden Spalten angebohrt sind; und zwar kann man wohl mindestens drei Hauptadern annehmen.

Die erste bei 106 m Tiefe,
die zweite bei 218 m Tiefe,
die dritte bei 267 m Tiefe.

Allerdings deuten die bei einer Tiefe von 338,2 m eingetretenen Erscheinungen noch auf eine vierte Kohlensäurespalte; doch ergab sich bei einer Untersuchung des Bohrloches im

Jahre 1908, daß der Teil unter 309 m versandet war. Wenn sich also wirklich noch bei 338,2 m Tiefe eine Ader befunden haben sollte, so ist sie jedenfalls nicht sehr stark gewesen, sonst müßte sie die Sandablagerung verhindert haben.

Über die Bewegungen des Wasserspiegels im Bohrloch während der Niederbringung desselben sind leider nur ganz spärliche Aufzeichnungen vorhanden. Daß besonders stark wasserführende Schichten oder Spalten erbohrt worden sind, kann aus den Aufzeichnungen nicht entnommen werden. Anscheinend handelt es sich aber um getrennte Wasser- und Kohlensäureadern.

Das Rohr, aus dem der Sprudel austritt, das Steigrohr, ist ein nahtloses Kupferrohr von 200 mm Durchmesser und 300 m Länge. Es reicht heute sicherlich bis zur Sohle des Bohrloches, wenn die erwähnte Versandung in demselben Maße fortgeschritten ist. Von 50 m abwärts ist es durchlocht und an seinem oberen Ende an einem Eisenrohr von 670 mm Durchmesser und 39 m Länge nahe an dessen oberen Ende befestigt (Fig. 6 A A'). Dieses Eisenrohr hat zusammen mit einem anderen, 470 mm weiten und 146 m langen Rohr die Aufgabe, das Bohrloch gegen süßes Grundwasser zu schützen. Daher ist jenes Rohr garnicht, dieses erst von 92 m abwärts durchlocht und der Raum zwischen den Rohren und dem Bohrloch bis zu 92 m Tiefe mit Cement ausgegossen. Demselben Zwecke dient ein nahtloses verzinntes Kupferrohr von 300 mm Weite und 65 m Länge, das unten gegen das 470er Eisenrohr mit einer Gummimanschette abgedichtet und zusammen mit diesem an dem 670er Eisenrohr (Fig. 6 bei B B') befestigt ist. Der Raum zwischen dem Kupferrohr und dem engeren der Eisenrohre ist wieder mit Cement ausgegossen. Unterhalb 92 m bis 100 m hat das Bohrloch einen Durchmesser von 600 mm, von 100 bis 180 m im Mittel 470 mm, dann bis 234 m 456 mm, bis 296 m 336 mm, und unter der Annahme, daß es auch jetzt noch bis 309 m aufgeschlossen ist, bis zu dieser Tiefe einen Durchmesser von 260 mm. Entsprechend diesen Durchmessern sind noch Eisenrohre zur Erhaltung des Bohrloches eingeführt; doch wurden bei der Untersuchung und teilweisen Neuverrohrung im Jahre 1908, bei der vor allem das erwähnte Steigrohr angebracht

wurde, diese Rohre zum Teil besonders im oberen Bohrloch entfernt, so daß es keinen Wert hat, ihre ursprünglichen Maße anzugeben. Schätzungsweise ergibt sich der Inhalt des Bohrloches zu rund 35,0 cbm.

Endlich sei noch bemerkt, daß die Oberkante des 670 mm weiten Eisenrohres sich 3 m über dem Erdboden befindet; dieser selbst hat eine Meereshöhe von 59,5 m, während der Nullpunkt des Andernacher Rheinpegels eine solche von 51,4 m hat. Der Abstand der Oberkante des Steigrohres von der des erwähnten Eisenrohres beträgt 1,25 m (siehe Fig. 6). Auf diese Eisenrohroberkante sind die Wasserspiegelmessungen bezogen.

Um nun das Mineralwasser und das Gas bei einem Ausbruch auffangen und verwerten zu können, hat man von dem Teile A' A' D' D (siehe Fig. 6) des 670er Eisenrohres aus eine Verbindung geschaffen mit einem geräumigen Bassin, das die Aufnahme des Wassers bewirkt, wenn das Sprudelrohr durch einen Deckel verschlossen wird. Von der Decke dieses Wasserbehälters geht eine weite Rohrleitung zu einem Gasometer, in dem sich die Kohlensäure sammelt. Im einzelnen sei — da es weiterhin wichtig ist — über die Maße des cylinderförmigen Wasserbehälters folgendes erwähnt:

Der Radius seiner Grundfläche ist 3,40 m, der Inhalt derselben also 36,3 qm; da aber die Mantelfläche an vier Stellen nach innen verstärkt ist, so ist der eigentliche Inhalt der Grundfläche etwas geringer. Leider waren genauere Zahlen darüber aus den vorliegenden Plänen nicht zu entnehmen.

Der Gasometer besteht, wie auch die meisten Leuchtgas-Gasometer, aus einer Eisenblechglocke, die auf Wasser schwimmt. Sein Durchmesser ist 9,0 m und seine Oberkante hat bei völlig gefülltem Zustande eine Höhe von 3,74 m über dem äußeren Wasserspiegel; da in dem Gasometer lt. Bericht ein Überdruck von 11 cm Wassersäule herrscht, so ist die Höhe der eingeschlossenen Gassäule 3,85 m, gemessen bei atmosphärischem Druck + 11 cm Wassersäule = 1,044 kg/qcm. Demnach ist sein Inhalt: $\pi \cdot 4{,}5^2 \cdot 3{,}85 = 244{,}9$ cbm ($p = 1{,}044$ kg/qcm) oder 247,3 cbm ($p = 1{,}033$ kg/qcm); also rund 250 cbm.

Von der Mitte des Gasometerdeckels geht ein Rohr vertikal abwärts, das in dem Augenblick, wo der Behälter gefüllt ist, aus dem Wasser herausragt und dem noch weiter einströmenden Gas den Austritt in die Luft gestattet. Bedeckt man diese Öffnung mit einem Tuch, so kann man den Augenblick der erfolgten Füllung daran erkennen, daß das Tuch von dem entweichenden Gase fortgeschleudert wird; der Gasometer „bläst ab". Der Schluß dieses „Abblasens" ist dadurch ziemlich genau angezeigt, daß die von der Kohlensäure erzeugte Schlierenbildung in der Luft aufhört.

Bevor ich nun dazu übergehe, über die eigenen Messungen am Sprudel zu berichten, möchte ich noch einige Mitteilungen machen über zwei andere Kohlensäuresprudel, die sich in nächster Nähe von Namedysprudel befinden. Der eine liegt in der Nähe der Wirtschaft Waldschloß an der Landstraße von Andernach nach Namedy in einer Wiese, wenige 100 m in der Luftlinie vom Namedysprudel entfernt. Er ist 223 m tief und ebenfalls in Rohre gefaßt; die Oberkante des Steigrohres von ungefähr 10 cm Durchmesser steht annähernd 1 m unter der Oberkante eines quadratischen gemauerten Bassins. Die Zwischenzeit dieses Sprudels soll fast genau und ohne bemerkenswerte Änderungen 6 Stunden betragen; die Dauer eines Ausbruches beträgt ½ bis 2 Stunden, wenn das Steigrohr keinen Aufsatz trägt und daher die ausgeschleuderten Wassermassen sich in dem Bassin sammeln und den austretenden Strahl behindern. Wird dagegen ein Rohr von ungefähr 2 m Länge und 10 cm Weite eingesetzt, so ist die Ausbruchdauer erheblich kürzer; auch soll der Strahl dann eine Höhe von 40 Metern erreichen. Leider waren genauere Mitteilungen nicht zu erhalten.

Der andere Sprudel befindet sich am Eingange des Dorfes Namedy, ungefähr 1 km vom Namedysprudel entfernt. Die Bohrung, die augenblicklich noch fortgesetzt wird, stand Herbst 1912 bei rund 400 m Tiefe und ergab bisher einen ziemlich starken Ausbruch von 1 Stunde 37 Minuten Dauer.

Grundlagen der Untersuchung.

§ 3. Die eigenen Messungen am Namedysprudel vom 21. Dezember 1911, 12.—15. März, 29. Mai und 16.—17. August 1912.

Die ersten von den vier eigenen, zu verschiedenen Zeiten angestellten Beobachtungen des Sprudels wurden ausgeführt am 21. Dezember 1911. Da sie lediglich dazu dienen sollten, einen allgemeinen Eindruck der Verhältnisse zu geben, wurde von eingehenderen und genaueren Messungen zunächst Abstand genommen. Doch sei hier gleich erwähnt, daß bei den ersten drei Besuchen der Sprudel in allen wesentlichen Punkten sich gleich verhielt.

Der erste Ausbruch wurde um $11^h\ 20^m$ vormittags beobachtet. Einige Zeit vorher wurde der Stand des Wasserspiegels mit einer Schnur abgelotet, an der die m und dcm kenntlich gemacht waren; an ihrem unteren Ende trug sie einen cylindrischen Korkschwimmer, der nur dann senkrecht zur Wasseroberfläche stand, wenn er von der straff angezogenen Schnur gerade getragen wurde. Diese Lage konnte von oben genau festgestellt werden. Die Stelle, bis zu der er in diesem Falle eintauchte, war vorher empirisch gefunden und bildete den Nullpunkt der auf der Schnur angebrachten dcm Teilung. Die Messung wurde bezogen auf die Oberkante des 670 mm-Rohres, die eine Meereshöhe von $(59{,}5 + 3)$ m $= 62{,}5$ m hat. Die Ablotung ergab einen Wasserspiegelstand von 9,5 m, d. h. also $(62{,}5 - 9{,}5)$ m $= 53{,}0$ m Meereshöhe. Der Rheinpegel zeigte an diesem Tage eine Höhe von 1,96 m, d. h. also nach Seite 16 eine Meereshöhe von 53,4 m. Kurz vor dem Ausbruch stieg der Wasserspiegel dann verhältnismäßig rasch. Der Sprudel sprang ungefähr 6 Minuten und erreichte dabei schätzungsweise

bei ziemlich starkem Winde eine Höhe von 40 m. Nach dem Ausbruch sank der Wasserspiegel tief in das Bohrloch zurück, doch wurden darauf während ungefähr 4—5 Minuten große warme Kohlensäuregasmengen entladen, denen ziemlich viel Schwefelwasserstoff beigemengt war. Die Zeit zwischen diesem und dem vorhergehenden Ausbruch betrug rund 4 Stunden 15 Minuten, zwischen diesem und dem folgenden fast 5 Stunden. Das Verhalten des Sprudels in der Zwischenzeit war genau wie vorher. Der Stand des Wasserspiegels betrug im wesentlichen 9,45 m; er war meist als glänzender Spiegel, ab und zu beunruhigt von Gasblasen, sichtbar und wurde nur einige Zeit vor dem Ausbruche durch Kohlensäureblasen stärker gestört. Ob Höhenschwankungen vorkamen, wurde nicht festgestellt, wie ja überhaupt die Messungen nur sehr wenig quantitativen Charakter haben sollten. Nachdem wieder vor dem Ausbruch der Wasserspiegel rasch angestiegen war, verlief jener selbst wie der zuerst beobachtete. Die größte Höhe des Strahles übertraf die des vorigen (der Wind hatte nachgelassen) und wurde anscheinend im Verhältnis zur ganzen Dauer der Erscheinung schon früh erreicht. Den Schluß bildete wieder eine ziemlich heftige, ungefähr 7 Minuten dauernde warme Gasausströmung. Bereits 9 Minuten, nachdem das letzte Wasser entleert worden war, war der Wasserspiegel bis auf 1,7 m unter seinem alten Stand gestiegen; 18 Minuten später trennten ihn nur noch 34 cm von diesem.

Da die auf Grund dieser Beobachtungen angestellten Untersuchungen im Laufe des Winters 1911—12 so weit fortgeschritten waren, daß eingehendere Messungen erforderlich waren, wurden in der Zeit vom 12. bis 15. März 1912 ausführliche quantitative Beobachtungen angestellt. Über die benutzten Meßgeräte sei folgendes erwähnt:

Zur Ablotung des Wasserspiegels diente wieder eine Schnur mit dcm-Teilung und Korkschwimmer. Die Lufttemperatur wurde mit einem Celsiusthermometer gemessen. Um mit ihm auch die Wassertemperatur in beliebigen Tiefen bestimmen zu können, wurde es in ein passendes Eisenrohr von 2 cm Durchmesser, das unten verschlossen war, so eingeführt, daß es nirgends die Wände berührte. Im oberen Teile des Rohres waren einige

Löcher angebracht, durch die das Wasser eintreten konnte. Mit Hilfe der Schnur wurde es bis in die Tiefe hinabgelassen, in der die Temperatur bestimmt werden sollte und mindestens 10 Minuten dort belassen. Vom Augenblick des Aufziehens bis zum Ablesen vergingen meist 50 Sekunden; da bis kurz vor demselben das Thermometer von solchem Wasser umgeben war, das die Temperatur der fraglichen Tiefe hatte, so kann der Unterschied der abgelesenen gegen die wahre Temperatur nur klein gewesen sein. Es wurden auch Temperaturmessungen an dem herausgeschleuderten Strahl unternommen; doch konnte das Thermometer höchstens 30 Sekunden lang in den Strahl gehalten werden, weil schon kurze Zeit nach Beginn des Ausbruches die ganze Umgebung des Sprudelloches von Kohlensäure erfüllt war. Infolgedessen muß bei diesen Messungen am Strahl die Temperatur der Luft mit in Betracht gezogen werden.

Um eine weiter unten zu besprechende Theorie zu prüfen, war es nötig, die verschiedenen Höhen zu messen, die der ausgeschleuderte Strahl im Verlaufe eines Ausbruches erreichte. Dazu fertigte ich mir einen einfachen, leicht zu handhabenden Höhenmesser an, wie er in Keilhak, Lehrbuch der praktischen Geologie, S. 10 beschrieben ist. Zur Erläuterung diene Figur 1 und 2, siehe Tafel. CD stellt das Rohr dar, mit dem die Spitze des zu messenden Gegenstandes anvisiert wird; es ist ungefähr 75 cm lang und trägt auf der einen Seite einen gezahnten Blechstreifen mit cm-Teilung, der senkrecht auf dem Rohrmantel befestigt ist. Dem Nullpunkt der Teilung gegenüber ist vertikal zum Rohr verschiebbar ein Eisenstab mit 5-cm-Teilung angebracht, der an seinem rechtwinklig gebogenen Ende einen rund 1 m langen Faden mit anhängendem kleinen Gewichte trägt. Der ganze Apparat wird an einem Stativ so befestigt, daß das Rohr nach allen Richtungen frei drehbar ist. Bei der Benutzung macht man das Stück OF der Stange FE in cm gleich der in m gemessenen Standlinie, die ungefähr der Höhe des zu messenden Gegenstandes entsprechen soll; visiert man dann an, so stellt sich der Faden in der Richtung ein, die auf der Skala der Höhe des Gegenstandes entspricht. Durch Drehung des Rohres CD um seine Achse wird der Faden veranlaßt, sich in die ent-

sprechende Zahnlücke zu legen. Die zu dieser gehörende Zahl gibt dann die Höhe des Gegenstandes in m.

Der besseren Übersicht halber werde ich die Messungen vom 29. Mai 1912 gemeinsam mit denen im März desselben Jahres erledigen, da sie in allen wesentlichen Punkten übereinstimmen. Nur in einer Hinsicht war eine Änderung eingetreten, die ich gleich hier besprechen möchte. Bei meinem Besuche am Sprudel im März nämlich hatte sich oben an der Mündung, wo der Raum zwischen dem Steigrohr und dem 670er Eisenrohr geschlossen ist, eine undichte Stelle gebildet. Da nun das Steigrohr das Verschlußstück um einige cm überragt (Fig. 6 ee'), so blieb stets in dem dadurch gebildeten Bassin eine Menge Wasser vom letzten Ausbruch zurück. Entwich also durch die undichte Stelle aus dem Zwischenraum Kohlensäure, so mußte sie durch das Wasser hindurch, woran ihre in der Zwischenzeit in bestimmter Weise wechselnde Menge gut beurteilt werden konnte. Im Mai war die Undichtigkeit so stark geworden, daß das Wasser durch sie in den Zwischenraum abfloß, sodaß sich jetzt der in der Zwischenzeit entweichende Kohlensäurestrom nicht mehr bemerkbar machte.

Da sich alle Beobachtungen am 12., 13. und 14. März und 29. Mai 1912 bis auf einige unwesentlichen Einzelheiten vollkommen decken, so glaube ich davon absehen zu dürfen, alle Messungen anzuführen. Es wird daher im folgenden nur über je eine Zwischenzeit-Beobachtung vom 13. und 14. März und 29. Mai, und über drei Ausbrüche vom 12., 13. und 14. März genauer berichtet werden. Die angewandten Abkürzungen haben folgende Bedeutung:

CO_2 a: außen an der undichten Stelle strömt etwas Kohlensäure aus.

CO_2 i: innen zeigt der Wasserspiegel im Steigrohr geringe Kohlensäureentwicklung.

In demselben Zusammenhang bedeutet:

a! oder i! : stark
a!! oder i!!: sehr stark } Kohlensäure.
(a) oder (i): keine

Ein Strich in einer Rubrik deutet an, daß entsprechende Beobachtungen nicht angestellt wurden.

Höhe des mittleren Sprudel- und Rheinwasserstandes.

21. XII. 1911	53,00 m	53,36 m
11. III. 1912	—	55,74 m
12. III. 1912	55,10 m	55,41 m
13. III. 1912	55,20 m	55,14 m
14. III. 1912	55,10 m	54,90 m
15. III. 1912	54,77 m	54,75 m
29. V. 1912	55,12 m	55,16 m

Allgemeine Übersicht.

12. III. Barometerstand: 763,3 mm.
1. Ausbruch: 11 Uhr vormittags, Dauer: —
Zwischenzeit: 5 Stunden.
2. Ausbruch: 4 Uhr nachmittags, Dauer: —

13. III. Barometerstand: 764,4 mm.
1. Ausbruch: 7 Uhr vormittags, Dauer: 5—6 Minuten.
Zwischenzeit: 3 Stunden 45 Minuten.
2. Ausbruch: 10 Uhr 45 Minuten vormittags.
Dauer: 5 Minuten 40 Sekunden.
Zwischenzeit: 5 Stunden 21 Minuten.
3. Ausbruch: 4 Uhr 15 Minuten nachmittags.
Dauer: 5 Minuten 3 Sekunden.

14. III. Barometerstand: 757,5 mm.
1. Ausbruch: 6 Uhr 30 Minuten vormittags, Dauer: —
Zwischenzeit: rund 3 Stunden.
2. Ausbruch: 9 Uhr 30 Minuten vormittags.
Dauer: 5 Minuten 1 Sekunde.
Zwischenzeit: rund 5 Stunden 15 Min.
3. Ausbruch: 2 Uhr 45 Minuten.

15. III. Barometerstand: 755,3 mm.
1. Ausbruch: 7 Uhr 45 Minuten vormittags, Dauer: —
Zwischenzeit: rund 5 Stunden 15 Min.
2. Ausbruch: 1 Uhr nachm., Dauer: 5 Minuten 7 Sek.

29. V. Barometerstand: —
1. Ausbruch: 4 Uhr 30 Minuten vormittags, Dauer: —
Zwischenzeit: rund 6 Stunden.
2. Ausbruch: 10 Uhr 30 Min. vorm., Dauer: 5 Min. 20 Sek.

I. Die Zwischenzeiten.

Zeit	Höhe des Wasserspiegels	Kohlensäure	Bemerkungen
13. III.			
10 h 52 m	—	Schluß des Ausbruches	
10 h 53 m	unsichtbar	a!! i!!	
10 h 54 m	1,25[1])	a!! i!!	Nachausbruch
10 h 55 m	—	—	Wasserspiegel sinkt schnell
10 h 58 m	8,36	a!! i!!	
11 h 2 m	7,66	a!! i!!	
11 h 23 m	7,41	—	
12 h	7,36	a i	CO_2 schwach
2 h 40 m	7,24	a i	CO_2 lebhafter
3 h 30 m	7,20	a! i	
3 h 40 m	6,81	a! i!	
3 h 45 m	7,16	a! i!	
3 h 50 m	7,26	a i	
4 h	7,24	a [i]	
4 h 5 m	7,24	a i	
4 h 9 m	6,46	—	
4 h 10 m	6,16	—	CO_2 wahrscheinlich a!! i!!
4 h 12 m 30 s	1,25[1])	—	
4 h 13 m	Strahl		
4 h 18 m 3 s	—	Schluß des Ausbruches[2])	
14. III.			
6 h 30 m	—	Schluß des Ausbruches	
8 h 20 m	7,39	a [i]	
8 h 30 m	—	—	Wasserspiegel steigt etwas
8 h 45 m	—	a i!	
8 h 47 m	7,49	—	
8 h 50 m	7,44	a i!	

1) d. h. Wasser fließt über die Steigrohroberkante; vergl. dazu S. 16 über den Nullpunkt der Messung.

2) vergl. Fig. 7.

Zeit	Höhe des Wasserspiegels	Kohlensäure	Bemerkungen
8 h 55 m	7,39	a i	
8 h 57 m	—	[a] [i]	
8 h 58 m	—	[a] i!!	
8 h 59 m 30 s	7,44	a! i!!	
9 h 1 m 30 s	7,44	a! i!	
9 h 13 m	7,44	a i	
9 h 17 m	—	a!! i!!	
9 h 21 m 10 s	1,25	a!! i!!	
9 h 21 m 30 s		Ausbruch	
9 h 26 m 30 s		Schluß des Ausbruches	
9 h 31 m	—	a!! i!!	Nachausbruch; erreicht den Steigrohrrand nicht.
9 h 33 m	—	a! [i]	
10 h 50 m	—	a [i]	
29. V.			
4 h 30 m		(vormittags) Schluß des Ausbruches	
7 h 50 m	7,45	i schwach	
9 h 45 m	7,32	i etwas stärker	
9 h 50 m	7,20	i etwas stärker	
9 h 51 m	7,08	i!!	
9 h 51 m 30 s	7,30	i!!	
9 h 53 m 30 s	7,30	i!!	
9 h 55 m	7,15	i!!	
9 h 59 m	7,35	i!!	
10 h 2 m	7,40	i!	
10 h 25 m	7,10	i	
10 h 28 m	—	Ausbruch	
10 h 33 m 20 s	—	Schluß des Ausbruches	
10 h 37 m	—		Nachausbruch; Überfl.
10 h 39 m		Schluß des Nachausbruches	
10 h 39 m 20 s	sinkt	i!!	
10 h 45 m	8,10	i!	
10 h 50 m	7,70	i!	

II. Die Ausbrüche.

Am 12. und 13. III. betrug die Standlinie 45 m, am 14. III 35 m senkrecht zur Windrichtung. Am 29. V. wurden keine Höhenmessungen vorgenommen, doch verlief der Ausbruch wie die im März beobachteten. Die angegebenen Zeiten sind von dem Augenblick an gerechnet, in dem der Strahl über den Rand des 670er Rohres trat.

Zeit	Höhe	Bemerkungen	Zeit	Höhe	Bemerkungen
		12. III.			**13. III.**
40 s	44 m		58 s	48 m	
1 m 15 s	42 m		1 m 40 s	37 m	
1 m 45 s	38 m		2 m 7 s	32 m	
2 m 27 s	30 m		2 m 27 s	35 m	
		Ansteigen	2 m 40 s	30 m	
3 m 8 s	25 m		3 m 10 s	30 m	
		Ansteigen	3 m 50 s	19 m	
3 m 52 s	31 m		rd. 4 m 30 s	—	unter 15 m
4 m 50 s	28 m		5 m 40 s	—	Schluß
rund 6 m	—	Schluß			
		14. III.			
10 s	54 m		2 m 45 s	38 m	
54 s	46 m		3 m 15 s	32 m	
1 m 20 s	40 m		3 m 45 s	25 m	
1 m 45 s	38 m		4 m 15 s	16 m	
		auf und ab	4 m 30 s	—	unter 10 m
2 m 10 s	38 m		5 m 1 s	—	Schluß
		auf und ab			

Da die am 14. III. ausgeführten Messungen ein besonders deutliches Bild von dem Verlauf eines Ausbruches geben, so sind sie in Fig. 9 (siehe Tafel) zum Vergleich mit den Ausbrüchen vom 16. und 17. VIII. 12. in ein Koordinatensystem eingetragen, auf dessen horizontaler Achse die Zeiten, auf der vertikalen die Höhen abgetragen sind.

Die Messungen am 15. III. endlich bezogen sich auf die ausgeworfenen Wasser- und Gasmengen. Zu diesem Zwecke wurde nach Entleerung des Gasometers und des Wasserbassins dieses am Ablauf und das Sprudelrohr durch eine Eisenplatte verschlossen. Durch Abhören an dieser Platte stellte ich Anfang und Ende des Ausbruches fest. Die Einzelheiten ergibt die folgende Tabelle:

$1^h\ 1^m$ p. m.	Beginn des Ausbruches.
$1^h\ 1^m\ 12^s$	Gasometer beginnt zu steigen.
$1^h\ 5^m\ 17^s$	Gasometer bläst ab (s. S. 17).
$1^h\ 6^m\ 7^s$	Schluß des Wasser-Ausbruches.
$1^h\ 7^m\ 15^s$	Gasometer bläst noch stark ab.
$1^h\ 8^m$	Gasometer bläst schwächer ab.
$1^h\ 8^m\ 30^s$	Gasometer bläst nicht mehr ab.

Nach dem Ausbruch stand das Wasser 67 cm hoch im Bassin; die Schüttung betrug also $(36{,}3 \cdot 0{,}67) = 24{,}3$ cbm; oder da nach S. 16 die Zahl 36,3 als etwas zu groß angesehen werden muß, rund 24 cbm Wasser. Diese Zahl stimmt gut überein mit den von der Verwaltung im Herbst 1908 angestellten Wassermessungen. Danach wurden bei 4 verschiedenen Ausbrüchen ausgeschleudert:

25,75 26,0 26,7 26,5 cbm.

Die Menge des ausgeworfenen Gases kann nur angenähert bestimmt werden. Die Füllung des Gasometers dauert 4 Minuten 14 Sekunden. In dieser Zeit werden rund $(250—20) = 230$ cbm Gas gefördert, wobei angenommen ist, daß in derselben Zeit 20 cbm Wasser zutage treten, die dann ein gleiches Volumen Gas aus dem Wasserbassin in den Gasometer pressen. Die Leistung des Sprudels während des Ausbruches ist also nicht ganz 1 cbm/sec. Gas. Da noch 50 Sekunden nach dem Abblasen Wasser mit Gas ausgestoßen wird, so kann man die in dieser Zeit gelieferte Gasmenge auf 40—50 cbm veranschlagen. Nun dauert das allmählich immer schwächer werdende Abblasen noch fast 2 Minuten 30 Sekunden und es erscheint nicht zu viel, die in dieser Zeit geförderte Gasmenge mindestens zu 25 cbm anzunehmen. Demnach ergibt sich, daß rund 300 cbm Kohlensäure im Minimum ausgestoßen werden.

Temperaturmessungen am Wasser wurden am 12. und 13. III. 1912 ausgeführt. Da an diesen Tagen die Lufttemperatur stets niedriger war als die Wassertemperatur, so geben die Zahlen infolge der vom Augenblick der Messung bis zum Ablesen möglichen Abkühlung des Thermometers die Mindestwerte der Wassertemperatur an. Die mitgeteilten Höchst-Lufttemperaturen (um 1 Uhr Mittags) beziehen sich auf den ungefähr 8 km von Andernach liegenden Ort Brohl am Rhein; ich verdanke sie dem freundlichen Entgegenkommen des Königl. Wasserbaurats Hill dortselbst; sie sind durch * kenntlich gemacht. Ich glaube sie zum Vergleich mit heranziehen zu dürfen, da der Unterschied der Luftwärme zwischen Andernach und Brohl nur gering sein kann und jedenfalls für unsere Zwecke keine Rolle spielt. Die Wassertemperatur im Bohrloch wurde rund 7,50 m unter dem Wasserspiegel gemessen.

	Wassertemp.	Lufttemp.
12. III. 12 Uhr mittags	15°,2 C.	9°,1 C.
(1 Std. n. Ausbr.)		11,2 C.*
3 Uhr 25 Min. nachm. (4 Std. 25 Min. nach Ausbruch).	14°,5 C.	
13. III. 4 Uhr 15 Min. nachm. (gegen Ende des Ausbruches)	16° C.	12,5 C.*
4 Uhr 45 Min. nachm. (30 Min. nach Ausbruch).	16° C.	

Diese Tabelle zeigt also, daß die Wassertemperatur bei einem Ausbruch und noch eine halbe Stunde danach mindestens 16 Grad C. beträgt; vielleicht hat der ausgeschleuderte Strahl eine noch höhere Temperatur gehabt, da wohl anzunehmen ist, daß das Thermometer, das vorher die tiefere Temperatur der Luft hatte sich in den 30 Sekunden[1]) nicht so weit erwärmen konnte, daß es die wahre Temperatur des Wassers anzeigte. Dafür spricht auch, daß noch eine halbe Stunde nach dem Ausbruch 16 Grad Celsius gemessen wurde, wo man doch eigentlich eine Abkühlung gegen das vom Winter her noch kalte Gestein erwarten sollte, wie sie ja auch tatsächlich

1) Vergl. S. 20.

am 12. III. längere Zeit nach einem Ausbruch festgestellt wurde.

Ob der Barometerstand die Sprudeltätigkeit in Bezug auf Zwischenzeit und Ausbruchdauer beeinflußt, kann aus den von mir angestellten Beobachtungen nicht entnommen werden, da dazu das Material nicht ausreichend genug ist; auch bei den Ausbrüchen selbst ist hinsichtlich der Höhe des ausgeschleuderten Wasserstrahles eine Abhängigkeit vom Barometerstand nicht festzustellen; schließlich kann das auch nicht erwartet werden, da vor allem die Windverhältnisse für die Größe der erreichten Höhe maßgebend sind.

Für die Bestimmung eines möglichen Einflusses des Barometerstandes auf die Sprudeltätigkeit können aber Beobachtungen herangezogen werden, die im Jahre 1908 vom 27. August bis 15. September von der Verwaltung angestellt worden sind und die sich auf die Dauer der Ausbrüche und der Zwischenzeiten beziehen. Vergleicht man aber die dafür angegebenen Zahlen mit den entsprechenden Barometerständen des benachbarten Neuwied[1]), da für Andernach selbst solche Aufzeichnungen nicht zu erhalten waren, so läßt sich ein Einfluß des Barometerstandes auf die Dauer der Zwischenzeiten nicht feststellen, wie sich auch eine Abhängigkeit der Zwischenzeit von der vorhergehenden Ausbruchsdauer nicht ergeben hat.

Zusammenfassend läßt sich also über die Sprudeltätigkeit bis Mai 1912 folgendes sagen:

Im Durchschnitt findet alle 3—6 Stunden ein Ausbruch von 5—6 Minuten Dauer statt. In der Zwischenzeit ist der Wasserspiegel in einer Höhe, die dem Rheinwasserstande entspricht, fast stets und mit Annäherung an einen Ausbruch immer lebhafter von Kohlensäureblasen beunruhigt sichtbar. Er zeigt eine langsame und stetige Aufwärtsbewegung von etwa 1 cm in 20 Minuten. Ungefähr 30—35 Minuten vor Beginn des Ausbruches steigt der Wasserspiegel unter starker Kohlensäureentwicklung plötzlich um 40—50 cm, um nach 15—20 Minuten

1) Durch die freundlichen Bemühungen der Wetterdienststelle Weilburg kam ich in den Besitz dieser Daten; ich schulde Herrn Prof. Freybe dafür großen Dank.

wieder ungefähr auf seinen alten Stand zurückzusinken (I. Ansteigen des Wasserspiegels); nach und nach nimmt auch die Kohlensäureentwicklung wieder ihre gewöhnliche Stärke an, die sie sonst in der Zwischenzeit zeigt, bis dann nach einigen Minuten aufs Neue eine plötzliche Hebung des Wasserspiegels mit starker Kohlensäureentbindung eintritt (II. Ansteigen) uud der Ausbruch beginnt, der nach 3—4 Minuten damit seinen Anfang nimmt, daß das Wasser zunächst 20—30 Sekunden anfangs ruhiger, dann stürmischer über den Steigrohrrand fließt. Alsdann erscheint der Strahl an der Oberkante des 670er Rohres, steigt in einigen kräftigen Stößen rasch an, und hat nach mindestens einer Minute, am 14. III. bereits nach 10 Sekunden, seine größte Höhe von 40—55 m erreicht. Die zweite Minute bringt ein langsames Absteigen des Strahles auf 30—40 m; auf dieser Höhe hält er sich, wobei natürlich stets Schwankungen von ungefähr 5 m auftreten, in der dritten und teilweise auch noch in der 4. Minute, um dann gegen Ende derselben und im Verlauf der 5. unter lebhaften Schwankungen weiter abzusteigen, und meist in der 6. zu verschwinden, wieder unter lebhaften Zuckungen, die ihn mehrere Male in das Bohrloch zurückfallen und bis zu 5 m wieder aufsteigen lassen; seine Temperatur ist mindestens 16 Grad C. Unter starkem Getöse sinkt darauf der Wasserspiegel tief in das Steigrohr hinab; dafür strömen jetzt, wie ich es auch im Dezember 1911 beobachtete (S. 19), große Mengen warmen Gases aus, manchmal mit solcher Gewalt, daß sie das langsam wieder ansteigende Wasser mit sich fortreißen und über den Steigrohrrand schleudern. Diesen „Nachausbruch", wie ich die Erscheinung nennen will, beobachtete ich besonders deutlich am 29. V. 12.; die mehr als 2 Minuten dauernde Wasserentleerung war so stark, daß sie fast den Rand des 670er Rohres erreichte. Den Beschluß des ganzen eindrucksvollen Schauspieles bildet ein jähes und schnelles, oder falls der Nachausbruch den Steigrohrrand nicht erreichte, langsames Zurücksinken des Wasserspiegels unter fortdauernder starker Kohlensäureentbindung, die auch dann meist noch nicht aufhört, wenn der Spiegel ungefähr 6—8 Minuten nach Schluß des Hauptausbruches rund 1 m unter seinem gewöhnlichen Stande wieder sichtbar geworden ist.

Diese Gasentbindungen in der Zwischenzeit sind für die Beurteilung einer später zu erwähnenden Theorie sehr wichtig; es möge daher darüber noch einmal zusammenfassend berichtet werden:

In der ganzen Zwischenzeit finden mit ganz geringen Ruhepausen Kohlensäureentwicklungen an der undichten Stelle und im Steigrohre statt; sie sind besonders stark nach erfolgtem Ausbruche, sogar auch dann noch, wenn der Spiegel des neu in das Bohrloch eingetretenen Wassers wieder sichtbar geworden ist. Im Anschluß an das erste plötzliche Ansteigen und Sinken des Wasserspiegels vor einem Ausbruch treten sie ebenfalls sehr stark auf.

Die Beobachtungen vom 16. und 17. VIII. 1912.

Um das Verhalten des Sprudels in einigen Punkten nachzuprüfen, suchte ich ihn am 16. VIII. 12 noch einmal auf; doch wichen die jetzt gemachten Beobachtungen so sehr von den früheren ab, daß ich auf eine ausführliche Mitteilung derselben nicht verzichten zu können glaube, zumal sie, wie wir später sehen werden, eine wesentliche Stütze für die neuen Anschauungen über die physikalischen Grundlagen intermittierender Sprudel bilden. Da eine Messung der Höhen des ausgeschleuderten Strahles nicht mehr vorgesehen war, mußte ich mich auf eine schätzungsweise Feststellung beschränken. Zunächst wieder eine allgemeine Übersicht:

16. VIII. 1. Ausbruch: 8 Uhr 10 Min. vorm.; Dauer: —
Zwischenzeit: rund 3 Std.

2. Ausbruch: um 11 Uhr; Dauer: 3 Min. 47 Sek.
Zwischenzeit: rund 3 Std.

3. Ausbruch: um 2 Uhr 6 Min.; Dauer: 4 Min. 28 Sek.
Zwischenzeit: 2 Std. 51 Min.

4. Ausbruch: 4 Uhr 57 Min.; Dauer: 4 Min. 9 Sek.
Zwischenzeit: rund 3 Std.

5. Ausbruch: um 8 Uhr; Dauer: —

17. VIII. 1. Ausbruch: um 8 Uhr 10 Min. vorm.; Dauer: —
Zwischenzeit: 2 Std. 48 Min.
2. Ausbruch: um 10 Uhr 58 Min.; Dauer: 3 Min. 50 Sek.
Zwischenzeit: 2 Std. 57 Min.
3. Ausbruch: 1 Uhr 55 Min.; Dauer 4 Min.

Durchschnittlicher Wasserstand im

Sprudel:	Rhein:
16. VIII. 55,35	55,22 m über NN
17. VIII. 55,50	55,60 „ „ „

Über die Messungen im einzelnen geben die folgenden Tabellen Aufschluß. Es sind dieselben Abkürzungen angewandt, wie sie auf Seite 21 angegeben sind.

Zeit	Höhe des W.-Sp.	Bemerkungen	Zeit	Höhe des W.-Sp.	Bemerkungen
		16. VIII.	1 h 52 m 30 s	7,12	i!
rd. 11 h	—	Ende des II. Ausbruches	1 h 54 m 10 s	6,80	i!
			1 h 55 m 30 s	6,15	i!
11 h 30 m	7,28	i!! W.-Sp. schaumig	1 h 58 m 15 s	3,80	i!! schaumig
				Mehrere Min. zwischen 2 und 3 m	
12 h 8 m	—	Wassertemp. 14,5° C Lufttemp. 15,6° C	2 h 5 m 30 s	1,25	i!! Überfließen
			2 h 5 m 50 s	0	III. Ausbruch
			2 h 10 m 18 s	0	Überfließen
1 h 8 m	7,13	i!	2 h 11 m 48 s	1,25	
1 h 35 m	7,12	i!	2 h 13 m	2,25	i!! schaumig
1 h 41 m	7,02	—	2 h 15 m	7,50	i!!
1 h 42 m 10 s	6,90	—	2 h 16 m	7,35	i!!
1 h 43 m	6,98	—	2 h 35 m	7,20	i!
1 h 44 m	7,03	i!!	2 h 47 m	7,18	i!
1 h 46 m	7,10	i!!	4 h 25 m	7,12	i!
1 h 47 m 10 s	6,85	—	4 h 31 m	—	Wassertemp. 14,2° C
1 h 47 m 40 s	6,85	—			
1 h 48 m 20 s	6,95	—	4 h 40 m	—	Lufttemp. 15,5° C
1 h 49 m	7,05	i!			

Zeit	Höhe des W.-Sp.	Bemerkungen	Zeit	Höhe des W.-Sp.	Bemerkungen
		17. VIII.[1])			
rd. 11 h 2 m	—	Ende des II. Ausbruches	1 h 49 m	rd. 3,50	i!! schaumig
			1 h 54 m	rd. 2,00	i!! „
11 h 17 m	rd. 7,00	i!	1 h 55 m	1,25	Überfließen
		Wassertemp. 14,5° C	1 h 55 m 25 s	0	III. Ausbruch
			1 h 57 m 40 s	—	Wassertemp. 16° C[2])
12 h 5 m	7,00	i!			
1 h 5 m	6,98	i!	1 h 58 m 30 s	—	Wassertemp. 15° C
1 h 24 m	6,98	i!			
1 h 25 m	6,95	i!	1 h 59 m	—	Wassertemp. 14,8° C
1 h 27 m	6,70	i!			
1 h 29 m	6,88	i!! schaumig	1 h 59 m 25 s	1,25	Wassertemp. 14,5° C
1 h 30 m	6,85	i!! „			Schluß.
1 h 31 m	6,60	i!! „	2 h — 40 s	rd. 2,00	i!! schaumig
1 h 37 m	6,48	i!!	2 h — 45 s	1,25	i!! „ Überfließen
1 h 38 m	6,60	i!!	2 h 1 m 55 s	1,25	Schluß des Überfl.
		fällt u. steigt			
1 h 40 m	6,35	i!!			
1 h 42 m 40 s	6,00	i!!	2 h 18 m	—	i!! Wassertemp. 14,2° C
1 h 43 m 20 s	5,75	i!! schaumig			
1 h 46 m 30 s	5,00	i!! „ steigt langsam	2 h 19 m	7,04	i!!

1) Vergl. Fig. 8 (siehe Tafel).

2) Da das Thermometer mit fortschreitendem Ausbruch immer mehr abnehmende Temperaturen anzeigt, anderseits aber die Wassermengen aus immer größeren Tiefen kommen, und man darum eine zunehmende Temperatur erwarten sollte, mußte daraus geschlossen werden, daß das Thermometer sich von der Anfangstemperatur der umgebenden Luft von 23 Grad C beim Anstellen der ersten Messungen noch nicht bis auf die wahre Wassertemperatur abgekühlt hat; der Wert von 14,5° C scheint am ehesten der Wirklichkeit zu entsprechen und noch eher zu hoch als zu niedrig zu sein, da bei der ungefähr 20 Minuten später angestellten Messung im Bohrloch selbst nur 14,2° C als Wassertemperatur festgestellt wurde.

Die Ausbrüche III. am 16. und II. am 17. August.[1])

Zeit	Höhe des W.-Sp.	Bemerkungen	Zeit	Höhe des W.-Sp.	Bemerkungen
	16. VIII.			**17. VIII.**	
$2^h\ 5^m 50^s$	0	steigt auf 15—20 m	$10^h\ 58^m 25^s$	0	Ausbruch steigt auf 15—20 m
$2^h\ 6^m 15^s$	rd. 20	dann Fallen			
$2^h\ 6^m 50^s$	rd. 3		$10^h\ 58^m 50^s$	fällt	
$2^h\ 7^m$	2		$10^h\ 59^m 25^s$	5	fällt noch etwas dann plötzliches Steigen.
$2^h\ 7^m\ 5^s$	2				
$2^h\ 7^m 15^s$	1	weiteres Fallen dann Steigen	$10^h\ 59^m 45^s$	50	
$2^h\ 7^m 30^s$	2		$11^h\ —\ 5^s$	fällt	
		plötzl. Steigen in 2—3 Stößen	$11^h\ —\ 30^s$	steigt	
			$11^h\ —\ 40^s$	steigt noch etwas, dann fallen	
$2^h\ 8^m 30^s$	55				
$2^h\ 9^m$	15		$11^h\ 1^m\ —$	25	
$2^h\ 9^m 35^s$	10		$11^h\ 1^m 20^s$	10	
$2^h\ 9^m 50^s$	6	verschw. schnell	$11^h\ 1^m 55^s$	8	
$2^h\ 10^m 18^s$	0	Überfließen	$11^h\ 2^m 15^s$	0	Überfließen
$2^h\ 48^m$	fällt	Schluß des Überfließens	$11^h\ 3^m 30^s$	—	Schluß des Überfließens.

Wie also der Verlauf der Zwischenzeiten und der Ausbrüche große Unterschiede gegen die früheren Beobachtungen anzeigt, so ist auch in der Temperatur des Wassers ein deutliches Sinken gegen das Frühjahr festzustellen, wo man eigentlich entsprechend der sommerlichen Wärme ein Steigen, wenigstens bei den im Bohrloch selbst angestellten Messungen erwarten sollte.

In der folgenden Tabelle bedeutet

τ = Zeit nach dem vorhergehendem Ausbruch.

t_w = Wassertemperatur, 7,50 m unter dem Wasserspiegel.

t_e = Lufttemperatur.

T = Tag und Nummer des Ausbruches.

1) Vergl. Fig. 9.

τ	t_w	t_e	T	τ	t_w	t_e	T
	mindest.				höchst.		
0^m	16°	12,5° [1]	13. III.; 3.	0^m	14,5°	23°	17. VIII.; 3.
				0^m	14,5°	15,5°	16. VIII.; 4.
				15^m	14,5°	17°	17. VIII.; 2.
30^m	16°	12,5° [1]	13. III.; 3.	18^m	14,2°	23°	17. VIII.; 3.
60^m	15,2°	9,1°	12. III.; 1.	60^m	14,5°	15,6°	16. VIII.; 2.
				2^h —	13,8°	17°	17. VIII.; 1.
$4^h\ 30^m$	14,5°	11,2° [1]	12. III.; 1.	$2^h\ 30^m$	14,2°	15,5°	16. VIII.; 3.

Für die Feststellung, um wieviel die Temperatur des Sprudelwassers gesunken ist, kommen in erster Linie die Messungen gegen Ende eines Ausbruches selbst und kurz danach in Betracht. Während also im März die Lufttemperatur stets geringer war als die des Wassers, und demgemäß, da das Thermometer bei Beginn der Messung die Lufttemperatur angenommen hatte, die für das Wasser erhaltenen Werte eher zu niedrig als zu hoch sind, überwog im August die Luft- die Wassertemperatur. Die für die letztere gefundenen Werte stellen also, wenn sie wegen der Trägheit des Thermometers nicht genau sein sollten, Maximalwerte dar. So folgt, daß die Temperatur des Wassers um mindestens 1,5 Grad Celsius gesunken ist. Daß diese Differenz bei größerem zeitlichen Abstand von einem Ausbruch kleiner wird, erklärt sich ohne weiteres daraus, daß die Abkühlung des oberen Teiles der Wassersäule gegen das Gestein, bezw. die Bohrlochwandung im Frühjahr stärker sein muß als im Hochsommer.

Vergleicht man also diese Beobachtungen mit denen vom Dezember 1911, März und Mai 1912, so lassen sich folgende Abweichungen feststellen:

1. An die Stelle eines einheitlichen Ausbruches mit größter Höhe innerhalb der ersten Minute ist ein in zwei deutlichen Phasen verlaufender Ausbruch getreten. In der ersten Phase steigt der Strahl bis höchstens 25 Meter, um dann auf 5, ja sogar 1—½ Meter zurückzugehen. Ganz plötzlich setzt darauf

1) Vergl. die Bemerkg. auf S. 27 über die Lufttemp.

zu Beginn oder Mitte der zweiten Minute die zweite (Haupt-) Phase ein, bei der innerhalb weniger Sekunden Höhen von 50—60 Meter erreicht werden. Ungefähr eine Minute hält sich der Strahl mit einigen Schwankungen auf dieser Höhe, dann erfolgt ein ziemlich schneller Abstieg auf 10—15 m und nach einer weiteren Minute ist der Ausbruch zu Ende. Setzt die zweite Phase erst nach ungefähr einer Min. 30 Sek. nach Beginn des Ausbruches ein, so beträgt seine Dauer im Durchschnitt 4 Min. 30 Sek., andernfalls kaum 4 Min. Die Zeit der Sprudelerscheinung ist also um durchschnittlich 1 Min. zurückgegangen.

2. Der früher dem Wasserausbruch stets nachfolgende Gasausbruch bei unsichtbarem Wasserspiegel und der sich daran anschließende Nachausbruch finden nicht mehr statt. Der Wasserspiegel sinkt vielmehr bis zu einer dem Rheinwasserstand etwa entsprechenden Tiefe, wobei seine Oberfläche von aufsteigenden Kohlensäure-Blasen noch lange Zeit schaumig erscheint. Doch ist zu beachten, daß der kurz nach dem Ausbruch sichtbare Wasserspiegel nicht etwa das obere Ende der im Bohrloch befindlichen Wassersäule angibt. Was hier sichtbar ist, sind vielmehr die fein verteilten Wassermengen, die, bei dem Ausbruch hochgehoben, jetzt von den langsam immer noch aufsteigenden Gase mit empor geführt werden. Dieser Wasserspiegel ist daher nur ein scheinbarer, der wirkliche wird sich auch jetzt tief im Bohrloch befinden, wenn auch nicht so tief, wie bei den alten Ausbrüchen, da ja ein Ausbruch nur kürzere Zeit dauert, die Bohrlochentleerung daher nicht mehr so stark und darum die Verkürzung der Wassersäule nicht so groß ist wie früher.

3. Die Temperatur des ausgeschleuderten Wassers ist um durchschnittlich 1,5 Grad C zurückgegangen; besonders beachtenswert erscheint, daß selbst gegen Ende des Ausbruches kaum 14,5 Grad C erreicht werden, gegenüber früheren Werten von mindestens 16 Grad.

4. Die Kohlensäureentwicklung im Steigrohr in der Zwischenzeit hat erheblich zugenommen; der Wasserspiegel ist stets von aufsteigenden Gasblasen bewegt. Diese Gasentbindung wird bei den auch jetzt noch und in derselben Weise auftretenden

Schwankungen des Wasserspiegels so stark, daß seine Oberfläche schaumig erscheint.

5. Das plötzliche Ansteigen des Wasserspiegels vor einem Ausbruch erfolgt erheblich langsamer und nimmt 8—15 Minuten in Anspruch, wobei ein Zurücksinken um 50—100 cm nicht selten ist.

6. Entsprechend meinen Beobachtungen, daß der Gasometer in 4 Min. 17 Sek. bei einem gewöhnlichen Ausbruch gefüllt wird, diese Ausbrüche aber meist kaum 4 Min. dauern, werden nach Mitteilungen des Werkmeisters der Namedygesellschaft stets weniger als der Gasometerinhalt, also 250 cbm Gas ausgeworfen. Auch die Wasserschüttung soll geringer geworden sein.

Dieses Verhalten des Sprudels soll nach den Beobachtungen der Inspektion der Namedygesellschaft ohne irgend welche erkennbare äußere Veranlassung etwa Mitte Juli 1912 begonnen haben, nachdem die Ausbrüche vorher fast stets alle 6 Stunden erfolgt waren.

Ältere Erklärungsversuche.

§ 4. Die Erklärung intermittierender Sprudel von Pictet und Andreae.

Zur Erklärung intermittierender Sprudel liegen u. a. zwei vollkommen übereinstimmende, aber anscheinend ganz unabhängig voneinander aufgestellte Theorien vor, die von Raoul Pictet[1]) (1876) und die von A. Andreae[2]) (1893). Beide nehmen an der Sohle des Bohrloches einen größeren Hohlraum an, der etwa in mittlerer Höhe, nicht aber an seinem höchsten Punkte, angebohrt ist. Der Hohlraum steht in Verbindung mit Wasser und Gas führenden Spalten. Tritt nun Gas in den Hohlraum ein, so sammelt es sich an seinem höchsten Punkte, wobei gleichzeitig der Wasserspiegel immer tiefer gedrückt wird. Ist dieser Prozeß soweit vorgeschritten, daß die Wasseroberfläche die Mündung des Bohrloches nicht mehr verschließt, sodaß Gas in die Wassersäule eintritt, dann wird in dem Maße, wie die Gasblasen ansteigen und sich dabei ausdehnen, Wasser im Bohrloch verdrängt und daher ein Ausfluß über Tage erzeugt. Das bedeutet aber eine Verkürzung der auf dem Gasraum lastenden Wassersäule, also eine Druckverminderung.

Infolgedessen wird das Gas in dem Hohlraum sich ausdehnen, mit großer Gewalt in das Steigrohr strömen und das

1) R. Pictet: Notice sur la fontaine intermittente de Vichy-les-Bains. Bibl. Universelle et Revue Suisse; Nouvelle Periode. Bd. 57. Genf 1876, pag. 57—76.

2) A. Andreae: Intermittierende Springquellen ohne Dampf, oder Gasgeysire. Neues Jahrb. f. Mineral. 1893, II., pag. 19 ff.

in ihm enthaltene Wasser ganz oder teilweise ausschleudern. Sobald nun aber infolge des ungehinderten Ausströmens der Druck des Gases in dem Hohlraum nachgelassen hat, strömt aus den Gesteinsspalten Wasser nach und verschließt die Bohrloch-Mündung, sodaß der Ausbruch zu Ende kommt.

---

§ 5. Konstruktion eines Apparates nach Pictet und Andreae.

Beide Verfasser haben auch einen Apparat angegeben, mit dem sich ihre Theorie praktisch darstellen läßt. Gemäß ihrer in allen wesentlichen Punkten übereinstimmenden Angaben stellte ich eine ähnliche Anordnung wie folgt her: Durch je eine der drei Öffnungen einer rund 3 Liter fassenden Woulffschen Flasche, die zur Hälfte mit Wasser gefüllt war, wurden eingeführt: 1. Ein Glasrohr, reichend bis zum Wasserspiegel, auf welches das auswechselbare Steigrohr aufgesetzt wurde; 2. ein bis zum Boden der Flasche reichendes Glasrohr, daß mit dem etwas unterhalb der Steigrohr-Oberkante angebrachten Wasser-Vorratsgefäß verbunden war; 3. ein bis wenig unter den Wasserspiegel reichendes Glasrohr, welches zu der mit einem Reduzierventil versehen Kohlensäurebombe führte. Der Ausfluß des rund 1,50 m langen Steigrohres war mit einem großen Becken zum Auffangen des ausgeschleuderten Wassers versehen. Befand sich der Wasserspiegel des Vorratsgefäßes unterhalb der Steigrohrmündung, so erfolgte natürlich kein Ausfluß. Wurde dann aber die Kohlensäure in schwachem Strome in die Woulffesche Flasche geschickt, sodaß die einzelnen austretenden Blasen gezählt werden konnten, dann erfolgte stets nach einer von der Stärke des Zustromes der Kohlensäure abhängigen Zwischenzeit ein Ausbruch; dieser befreite bei einem Steigrohrdurchmesser von 2,5 cm höchstens 25 cm der Steigrohrlänge von Wasser. War der Durchmesser 1,6 cm, so betrug unter sonst gleichen Verhältnissen die Wasserschüttung rund 35 cm der Länge des Steigrohres; dagegen wurde es ganz entleert bei 0,85 cm Durchmesser.

Wurde dieser noch kleiner gewählt, so betrug die ausgeworfene Wassermenge doch nie mehr als dem Inhalt des Steigrohres entsprach; dafür folgte aber dem Wasserausbruch ein umso stärkerer Gasausbruch, bis der Druck der Kohlensäure so gering geworden war, daß Wasser in die Flasche eindringen und dann bald die Steigrohröffnung verschließen konnte. Der ausgeschleuderte Wasserstrahl erreichte die größte Höhe gegen Ende des Ausbruches, weil dann das aufsteigende Gas infolge des jetzt nur noch kleinen auflastenden Wasserpfropfens seine größte Wirksamkeit entfaltete. Die Natur des drückenden Gases ist gleichgültig, wie analoge Versuche mit Preßluft, Sauerstoff und Stickstoff ergaben.

---

§ 6. Kritik der Theorie von Pictet und Andreae.

Jedenfalls ist diese Theorie nicht die einzig mögliche, da ich später zeigen werde, daß besonders geformte Hohlräume zur Erklärung des Intermittierens vollkommen unötig sind. Trotzdem könnte es aber möglich sein, daß in dem einen oder anderen Falle die von der Theorie angenommenen Verhältnisse vorliegen; dann müssen aber vor allem während der Bohrung ganz bestimmte Erscheinungen aufgetreten sein. Und zwar: Wurde die Bohrung bei der ersten auftretenden intermittierenden Sprudelerscheinung weiter fortgesetzt, so muß notwendigerweise ein Hohlraum im Gestein angetroffen sein; denn die Theorie verlangt, daß das Bohrloch direkt in einem Hohlraum steht. Es kommt nun leicht vor, daß während der Bohrarbeiten das intermittierende Verhalten aussetzt, und der Sprudel eine zeitlang vollkommen ausbleibt, bis erst, wenn das Bohrloch in größere Tiefen hinabgetrieben ist, das Intermittieren, meist mit veränderter Ausbruchs- und Zwischenzeitdauer wieder beginnt. Das kann nach Pictets und Andreaes Theorie dann nur die Folge von der Anbohrung eines neuen Hohlraumes sein. Allgemein müßte also nach dieser Theorie der Satz gelten: Es müssen bei einer Bohrung so viele Hohlräume angetroffen sein, als der Sprudel wechselndes intermittierendes Verhalten gezeigt hat. Die Halt-

losigkeit dieses Satzes für den vorliegenden Fall ergibt sich ohne weiteres aus der Bohrgeschichte des Namedysprudels, in der nirgends die Beobachtung eines Hohlraumes verzeichnet ist. (Vergl. S. 13). Ganz allgemein läßt sich gegen die Annahme eines oder mehrerer Hohlräume vor allen Dingen einwenden, daß ihre Existenz in Gesteinen wie den sogen. Coblenz-Schichten, in devonischen Grauwacken und Quarziten, vollkommen ausgeschlossen ist; nur im sogen. Lenne-Schiefer und besonders in Kalksteinen werden größere Hohlräume ab und zu angetroffen[1]).

Die Theorie Pictets und Andreaes kann also auf den Namedysprudel keine Anwendung finden.

---

§ 7. Die Theorie des Namedysprudels von F. Henrich, Wiesbaden.

Eine spezielle Erklärung des Namedysprudels hat F. Henrich[2]) gegeben. Der Grundgedanke seiner Überlegungen, die infolge ausgedehnter Berechnungen sogar quantitativen Charakter haben, ist kurz folgender: In das Bohrloch münden Spalten, die kohlensäurefreies oder kohlensäurearmes Wasser liefern. Am Grunde des Bohrloches ist eine kohlensäureführende Hauptspalte, aus der fortwährend Gas in das Bohrloch tritt. Dieses Gas wird nach einem Ausbruch zunächst vom Wasser absorbiert, steigt aber nach vollzogener Sättigung frei auf und verdrängt dabei soviel Wasser, als es selbst Raum einnimmt. Infolge der dadurch bedingten Hebung des Wasserspiegels kommt der obere Teil der Säule zum Ausfluß. Die dadurch in der Säule selbst entstehende Druckverminderung bewirkt ein Entweichen der in dem gesättigten Wasser absorbierten Kohlensäure, die dann ihrerseits wieder hebend wirkt und einen weiteren Teil der Säule zum Ausfluß bringt. Die aufsteigende gesättigte Säule wird

---

1) Herr Geheimrat E. Kayser, Marburg, war so freundlich. mich auf diese Tatsache ganz besonders aufmerksam zu machen.

2) F. Henrich: Der Namedysprudel bei Andernach. Zeitschr. f. prakt. Geol. 1910, pag. 447 ff.

durch seitlich oder am Grunde einströmendes ungesättigtes Wasser ersetzt, das die andauernd einströmende Kohlensäure wieder absorbiert. Je weiter der Ausbruch fortschreitet, um so geringer wird der Gehalt des Bohrloches an gesättigtem Wasser und frei aufsteigender Kohlensäure, bis der Ausbruch dadurch zu Ende kommt, daß dieser Gehalt schließlich gleich Null geworden ist. Es handelt sich also um eine auf Seite 12 unter 1. angegebene Erklärungsmöglichkeit; sie ist prinzipiell der bekannten Bunsenschen Geysirtheorie sehr ähnlich. Diese allgemeine Betrachtung versucht Henrich zu stützen durch ausführliche mathematische Berechnungen, z. T. auf Grund älterer eigener Untersuchungen[1]).

Zur bequemeren Behandlung ersetzt er das Bohrloch des Sprudels, das nach seinen Berechnungen einen Inhalt von 33,861 cbm hat, durch ein solches von gleichem Inhalt, das zunächst auf eine Erstreckung von 50 m einen Durchmesser von 0,20 m und dann auf weitere 293 m durchgehends 0,3746 m als Durchmesser hat; in diesem letzteren Teil soll sich die zu sättigende Wassersäule befinden. Da bei dem einzigen von ihm beobachteten Ausbruch die Zwischenzeit 4 Stunden 15 Minuten betrug und im Mittel nach seiner Meinung 225 cbm Gas ausgeschüttet werden, so schließt Henrich daraus, daß pro Sekunde wenigstens $\frac{225\,000}{15\,000} = 14{,}7$ Liter Gas, gemessen bei atmosphärischem Druck, an der Sohle des Bohrloches einströmen müssen. Er findet dann unter Benutzung eines Absorptionskoeffizienten für reines Wasser von 18[2]) Grad C., daß die Säule 329,4 cbm Kohlensäure, gemessen bei atm. Druck, absorbieren kann; von diesen müßten bei einer angenommenen Wasserschüttung von 33,86 cbm 299 cbm Gas an die Oberfläche kommen, weil 30,4 cbm in Wasser gelöst bleiben. Da aber nur 225 cbm Gas ausgestoßen werden, so versucht Henrich den Verbleib der übrigen 75 cbm damit zu erklären, daß er annimmt, sie seien zu Bildung der Hydrokarbonate des Natriums, Calciums, Magnesiums und Eisens verbraucht. Wenn nun nach vollzogener Sättigung die erwähnten

---

1) Vergl. Anm. S. 10.

2) Diese Zahl stammt wohl aus der auf S. 13 genannten Schrift von Pfeiffer; vergl. dazu die Beobachtungen auf S. 27.

14,7 Liter Gas frei aufsteigen und ein ihnen gleiches Volumen verdrängen, so müssen sie nach Henrichs Berechnungen in der Zeit, die zum Durchlaufen der ganzen Säule nötig ist, den Wasserspiegel in dem 50 m langen Rohr von 0,20 m Durchmesser um 15,5 Meter heben. Die weiteren Vorgänge stellt Henrich dann so dar: „Die aufsteigende gesättigte Säule entbindet in jedem Moment Kohlensäure, weil sie unter geringeren Druck kommt. Diese Kohlensäure verdrängt von neuem Wasser, das nur einen Ausweg nach oben findet, und von nun an wird die Geschwindigkeit des Wassers größer und größer". Nachdem (immer nach Henrichs Ansicht) in dieser Art und Weise die Wassersäule in dem 50 m hohen Aufsatzrohr vom Grunde derselben bis zur Oberkante aufgestiegen ist, beginnt der Ausfluß und damit der Ausbruch, der zwischen der 150. und 200. Sekunde sein Maximum erreichen muß, wie Henrich zunächst durch eine anschauliche Überlegung und dann auch unter ausführlicher mathematischer Begründung zeigt.

Da eine experimentelle Kontrolle dieser Theorie noch nicht vorlag und ich auch zu Beginn meiner Untersuchungen eigene umfassende Messungen, welche die Unzulänglichkeit dieser Theorie hätten erweisen können, noch nicht angestellt hatte, war es zunächst mein Bestreben, einen geeigneten Apparat zur Demonstration dieser Anschauung herzustellen, trotzdem mir bereits bei meinen ersten allgemeinen Beobachtungen an Ort und Stelle besonders bezügl. der Lage des Maximums des ausgeschleuderten Wasserstrahles Bedenken gegen diese Theorie aufgestiegen waren.

---

§ 8. Versuche einer experimentellen Kontrolle der Theorie von Henrich; Ergebnisse.

Die ersten Versuche dieser Art wurden angestellt mit zwei Apparaten, deren Steigrohrlängen 1,60 m bezw. 3,20 m betrugen. Am Grunde derselben war eine feine Glas-Kapillare eingeführt, die durch Glasrohr- und Schlauchleitung mit der Kohlensäurebombe verbunden war. Ebenfalls vom Grunde aus erfolgte die

Zuleitung des zu sättigenden reinen Leitungswassers. Die Versuche führten zu keinem Resultate, da die Kapillare nicht so fein ausgezogen werden konnte, daß die aus ihr entweichenden Gasblasen klein genug gewesen wären, um von der verhältnismäßig kurzen Wassersäule vollkommen verschluckt zu werden. Selbst wenn es möglich gewesen wäre, diese technische Schwierigkeii zu überwinden, so mußte trotzdem der Erfolg im voraus zweifelhaft erscheinen, da bei kohlensäurehaltigem Wasser sich sehr leicht Übersättigungserscheinungen ausbilden, derart, daß z. B. Wasser, das bei 0,3 atm. Druck gesättigt ist, bei einer Druckverminderung um z. B. 0,1 Atm., also 1 m Wassersäule, kein Gas abgibt. Selbst wenn also bei dem Apparat von 3,20 m Höhe die nach vollzogener Sättigung im Wasser frei aufsteigende Kohlensäure eine Hebung des Wasserspiegels und einen damit verbundenen Ausfluß von 1 m Steigrohrlänge erzeugt hätte, so würde dennoch keine Sprudelerscheinung aufgetreten sein, da eben gesättigtes Wasser auf Druckverminderung von z. B. 0,1 Atm. im allgemeinen nicht mit Gasentbindung reagiert. Anderseits würde eine solche mit einer genügend großen Gasmenge möglicherweise erreichbare Hebung der Wassersäule nicht mit der anderen Bedingung vereinbar gewesen sein, daß die aufsteigenden Blasen so klein sein mußten, daß sie ganz absorbiert wurden, weshalb also die ständig einströmende Gasmenge einen bestimmten Betrag nicht überschreiten durfte, der dann aber wieder zu einer genügenden Hebung der Säule nicht ausgereicht hätte. Infolgedessen gab ich dem dritten Apparate, den ich in einem der Treppenhäuser des Institutes erbaute, bedeutend größere Ausmessungen. (Vergleiche hierzu Figur 4). Das rund 10 m lange Steigrohr AB und die ebenso lange Druckleitung GH wurden an Eisenstäben, die mit einer vom Erdgeschoß bis zum dritten Stockwerk reichenden Balkenlage verbunden waren, mittels Stativmuffen und Klemmen vertikal befestigt. Das obere Ende des Steigrohres mündet in einem weiten, mit einem zum Hofe führenden Ablauf versehenen Becken aus. Auf die Oberkante des Steigrohres bei B können noch Glasröhren von 10 bis 50 cm Länge und beliebigem Querschnitt, durch Gummischlauch gedichtet, aufgesetzt werden. Das Druckrohr ist mit einem größeren Wassergefäß von rund 8 Liter

Inhalt verbuuden, das an einem Holzstativ in beliebiger Höhe, wie es die Versuchsbedingungen gerade erfordern, eingestellt werden kann. Damit während eines Versuches der Wasserspiegel in diesem Gefäß seinen Stand nicht ändert, ist in ihm ein selbsttätig wirkendes Schwimmerventil angebracht, das den Zufluß aus einem ungefähr 1 Meter höher gelegenen Blechkasten von rund 50 Liter Inhalt reguliert und bei einer bestimmten Höhe des Wasserspiegels gänzlich absperrt. Bei A' mündet das Druckrohr GH sofort in das Steigrohr ein; das Gefäß III wurde bei diesen Versuchen noch nicht benutzt; doch befindet sich noch bei C ein Glashahn mit Skala, durch den der Wasserzustrom geregelt werden kann. Die Kohlensäurezuführung geschah bei A, vorläufig noch ohne Benutzung der Gefäße IV und V. Es wurde nun zunächst versucht, ein dünnes Glasrohr in eine so feine Spitze auszuziehen, daß die damit erzeugten Kohlensäureblasen von der Wassersäule vollkommen verschluckt wurden. Nachdem das erreicht war, wurde solange Kohlensäure durchgeleitet, bis die Sättigung vollzogen war und die Gasblasen unabsorbiert bei B ankamen. Aber die dadurch herbeigeführte Hebung des Wasserspiegels war sehr klein, und gab, selbst wenn bei geeigneter Stellung des Gefäßes I Ausfluß erfolgte, dennoch zu keiner Sprudelerscheinung Anlaß. Um die Mengen der freiaufsteigenden Kohlensäure zu vergrößern, benutzte ich gleichzeitig 5 Kapillaren in der Anordnung, wie sie in Fig. 3 der Tafel II dargestellt ist. In das unten bis auf rund 3 cm Durchmesser erweiterte Steigrohr wurde ein mit Ansatz versehener Messingzylinder so eingefügt, daß ein Gummistopfen das Ansatzrohr gegen das Steigrohr abdichtete. In dem oberen Deckel waren die 5 Kappillaren in ebenso vielen Durchbohrungen eingekittet. Stand die Kohlensäure unter einem Druck von 1,5 Atm., dann trat folgende interessante Erscheinung auf: ungefähr 20 Minuten nach Beginn des Einleitens war die Säule gesättigt; der Wasserspiegel zeigte in dieser Zeit eine beständige Aufwärtsbewegung. War der Abstand des Wasserspiegels im Druckgefäß von der Oberkante im Steigrohr nicht zu groß gewählt, so kam es zu einem intermittierenden Ausfluß des gesättigten Wassers. Es bildeten sich nämlich im unteren Teil der Säule aus den nicht mehr absorbierten kleinen Gasblasen

solche, welche den ganzen Querschnitt des Rohres ausfüllten; indem sie aufstiegen, nahmen sie fast den größten Teil der auf ihnen lastenden Wassersäule mit empor, vorausgesetzt, daß der Hahn bei C geöffnet war, sodaß beständig ungesättigtes Wasser nachströmen konnte. In dem Maße aber, wie dies den unteren Teil der Röhre auszufüllen begann, hörte die Bildung der großen Blasen auf, da jetzt wieder vollkommene Absorption einsetzte: Der Ausfluß, der bei 3—5 mm Durchmesser höchstens in 2 cm hohem Strahle erfolgte, ging zu Ende, der Wasserspiegel sank wieder um 10—15 cm, um dann bald, ohne sich auf einen festen Punkt eingestellt zu haben, seine langsame Aufwärtsbewegung wieder zu beginnen. Diese Anordnung stellt also eine periodisch fließende Kohlensäurequelle dar; und zwar werden bei jedem Ausfluß rund $^1/_5$ des Steigrohrinhaltes entleert, sodaß nach je 5 Ausflüssen das Wasser im Steigrohr sich vollkommen erneuert hat. Blieb aber der Hahn C geschlossen, so hatten die aufsteigenden großen Blasen keine andere Wirkung, als daß sie soviel Wasser verdrängten, wie sie selbst Raum einnahmen. War eine dementsprechende Wassermenge ausgeflossen, so hörte die Wasserschüttung auf, und die Kohlensäure entwich ohne weitere Wirkung aus dem Steigrohr. Wurde dagegen der Hahn C so eingestellt, daß von den großen Blasen nicht mehr Wasser zum Ausfluß gebracht wurde, als in derselben Zeit unten im Steigrohr mit Kohlensäure gesättigt werden konnte, so floß die Quelle kontinuierlich unter stoßweiser Entleerung von Wasser, in dem Maße, wie große Blasen an die Oberfläche kamen und den Strahl für einen Augenblick unterbrachen. Diese Erscheinungen änderten sich nicht wesentlich, wenn das Druckgefäß I bis zu 20 cm nach abwärts verschoben wurde. Bei noch größerer Verschiebung trat kein Ausfluß mehr ein, da dann die Menge der aufsteigenden Kohlensäure nicht mehr hinreichte, den Wasserspiegel um die Strecke BB' zu heben. Diese Versuche zeigen also einmal, daß entgegen der Ansicht Henrichs die auftreibende Kraft großer, den ganzen Querschnitt ausfüllender Blasen nicht nur abhängig ist von ihrem Volumen, insofern sie eine dementsprechende Wassermenge verdrängen, sondern auch von der Größe des Wasserzuflusses zu dem Rohr, in dem diese Blasen aufsteigen.

Anderseits folgt vor allem daraus, daß die Wasserschüttung bei einem Ausfluß nur $^1/_5$ des ganzen Steigrohr-Inhalts beträgt, und ferner aus der Tatsache, daß der Wasserspiegel nie einen dem hydrostatischen Druck entsprechenden Stand einnimmt, sondern mit fortschreitender Sättigung beständig aufsteigt, daß eine Übereinstimmung der Erscheinungen am Apparat mit denen des Namedysprudels nicht vorhanden ist, wenn wir vorläufig ganz absehen wollen z. B. von der geringen Höhe des ausgeschleuderten Wasserstrahles, die nur bei ganz engem Aufsatz bis zu 13 cm groß war, (also nur rund $^1/_{77}$ der Steigrohr-Länge betrug, gegenüber dem entsprechenden Wert von rund $^1/_6$ beim Namedy-Sprudel), oder von dem Mißverhältnis zwischen Ausbruchs- und Zwischenzeit-Dauer, die fast gleich waren und rund 2 Minuten währten.

Was kann nun die Ursache des negativen Ergebnisses dieser Versuche sein?

1. Es kann unmöglich sein, die natürlichen Verhältnisse künstlich nachzuahmen;

2. Die Theorie kann unrichtig sein.

Was die erste Möglichkeit betrifft, so ist ohne weiteres zuzugeben, daß bei Versuchen in diesen verhältnismäßig noch kleinen Maßstäben vor allem die Übersättigungserscheinungen kohlensäurehaltigen Wassers eine große Rolle spielen. Denn wie sich ergab, bewirkten künstlich herbeigeführte Hebungen der Wassersäule bis zu 2 m noch keine Entbindung von Gas; d. i. $^1/_5$ der ganzen Länge des Steigrohres. Wenn man aber bedenkt, daß derselbe Bruchteil beim Namedysprudel (eine Tiefe von 300 m angenommen) rund 60 m ausmacht, was einer Druckverminderung von 6 Atm. gleichkommt, so sieht man leicht ein, daß, selbst die Richtigkeit der Theorie vorausgesetzt, eine vollkommene praktische Darstellung derselben unmöglich sein muß. Aber, wie die Betrachtungen des folgenden Abschnittes zeigen werden, sind auch gegen die Theorie selbst schwerwiegende Bedenken zu erheben.

§ 9. Kritik der Henrichschen Theorie.

In diesem Abschnitt werde ich zeigen, daß

I. grundlegende Annahmen nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen,

II. einige Folgerungen unrichtig sind,

III. demgemäß die Theorie zu anderen Erscheinungen führen müßte als der Sprudel sie darbietet;

IV. auch eine den tatsächlichen Verhältnissen angepaßte und auf Grund der Henrichschen Anschauungen aufgestellte modifizierte Theorie die Erscheinungen des Namedysprudels nicht erklären kann.

Zu I. 1. Das Bohrloch ist nicht 50 + 293 (vergl. S. 41) = 343 m, sondern heute höchstens noch 300 m tief.

2. Die Kohlensäure strömt nicht an der Sohle des Bohrloches bei 343 m ein, sondern aus mehreren Spalten zwischen 106 und 270 m Tiefe, am meisten wohl bei 218 m; daher sind alle Berechnungen, die sich an die Zahl 293 knüpfen, unrichtig.

3. Es werden nicht 33,861 cbm Wasser und 256,4 cbm Gas ausgeworfen, sondern im Mittel 24 cbm bezw. mindestens 300 cbm.

4. Es ist unrichtig anzunehmen, daß das Mineralwasser kohlensäurefrei oder -arm in das Bohrloch eintritt; denn der verhältnismäßig hohe Salzgehalt des Mineralwassers von rund 7 g auf 1 Liter deutet darauf hin, daß das Wasser beim Sickern durch das Gestein eine verhältnismäßig starke auflösende Wirkung entfaltet haben, also bereits mehr oder minder stark mit Kohlensäure gesättigt gewesen sein muß, als es in das Bohrloch eintrat. Daraus folgt aber, daß nicht 14,7 Liter Gas pro Sekunde in der Zwischenzeit in das Bohrloch einströmen, daß also alle Berechnungen, die sich an diese Zahl knüpfen, unrichtig sein müssen. Zu diesem Resultate führen aber nicht nur diese einfachen Überlegungen, sondern auch die an Ort und Stelle ausgeführten Beobachtungen, wie sie auf Seite 30 noch einmal zusammenfassend mitgeteilt sind; ersieht man doch daraus, daß in der ganzen Zwischenzeit Kohlensäureblasen aus der Wasser-

säule (die doch ungesättigt sein soll und alle Gasblasen absorbieren müßte) entweichen, und zwar besonders stark nach einem Ausbruch, wo man es eigentlich am wenigsten erwarten sollte. Im Gegenteil drängen gerade diese Erscheinungen zu der entgegengesetzten Annahme, daß das Wasser nicht kohlensäurearm, sondern kohlensäurereich in das Bohrloch eintritt.

Zu II. 1. Es ist unrichtig, wenn die Berechnung der von der Säule absorbierbaren Gasmenge unter Benutzung des Absorptionskoeffizienten für reines Wasser geschieht, und wenn an anderer Stelle die Differenz von rund 70 cbm Gas zwischen dem theoretischen und dem, wie Henrich annimmt, wirklichen Wert der ausgeworfenen Kohlensäuremenge durch die Annahme erklärt wird, daß diese 70 cbm zur Bildung der Hydrocarbonate verbraucht worden seien. Denn nach Untersuchungen von Setschenow[1]) nimmt in solchen Lösungen der Absorptionskoeffizient zu, welche Salze enthalten, die mit Kohlensäure reagieren, also z. B. Carbonate; andererseits bedingt die Anwesenheit solcher Salze, welche diese Eigenschaft nicht haben, wie z. B. die Chloride, eine Verminderung des Absorptionskoeffizienten. Da aber die Hydrocarbonationen im Namedyer Wasser die übrigen fast dreimal übertreffen, so wird der wahre Absorptionskoeffizient immer noch über dem des reinen Wasser als unter ihm liegen. Die durch die Anwesenheit der Salze veränderten Absorptionsbedingungen müssen also, wenn sie den Verbleib einer so großen Gasmenge erklären sollen, dann auch bei der Berechnung des absorbierbaren Kohlensäurequantums berücksichtigt werden.

Es ist unrichtig, wenn die Erscheinungen nach vollzogener Sättigung folgendermaßen beschrieben werden: „von nun an steigt die Kohlensäure frei in der Säule auf und verdrängt genau soviel Wasser, als sie selbst Raum einnimmt. Das vorher ruhige Wasser beginnt nun seine aufsteigende Bewegung“[2]).

---

1) Setschenow: Referat in den Fortschritten der Physik. 1876. 32. pag. 291.

2) Henrich: loc. cit. pag. 449.

Gerade das Gegenteil müßte stattfinden, wie eine kurze Überlegung sofort zeigen wird.

Zu Beginn der Sättigung werden zunächst nur die unteren, in der Nähe der Kohlensäureader befindlichen Teile der Säule das aufsteigende Gas absorbieren. Demgemäß wird seine frei auftretende Menge noch gering sein, der Wasserspiegel daher nur wenig höher gehoben sein, als wenn kein Gas die Säule durchströmt. Da nun mit Kohlensäure gesättigtes Wasser schwerer ist als kohlensäurefreies Wasser[1]), so wird dieses nicht aufsteigen, und daher nach einer gewissen Zeit das Wasser im Bohrloch, das der Kohlensäureader am nächsten ist, gesättigt sein. Die neu in die Säule eintretenden Kohlensäureblasen müssen also zunächst diese Schicht gesättigten Wassers durchlaufen, bevor sie absorbiert werden, d. h. die Menge des frei im Wasser befindlichen Gases ist größer als vorher, und demgemäß wird der Wasserspiegel in demselben Maße ansteigen. Diese aufsteigende Bewegung wird solange erfolgen, als die Absorption andauert; ist nach ihrer Beendigung noch kein Überlaufen erfolgt, so wird es nie zu einem Ausfluß oder gar Ausbruch kommen können. Doch scheint Henrich anderer Meinung zu sein, da er zu dem bereits (S. 42) zitierten Satz kommt, wonach erst jetzt die Säule ihre aufsteigende Bewegung in dem 50 m hohen Aufsatzrohr vom unteren Ende desselben an — also vorläufig noch ohne Ausfluß — beginnt „weil sie unter geringeren Druck kommt“ und darum in jedem Moment Kohlensäure entbindet. Aber die Druckverminderung, die eine aufsteigende Wassersäule erfährt, resultiert doch nicht aus der aufsteigenden Bewegung allein; denn die auf einem gewissen Querschnitt lastende Wassermenge bleibt dieselbe, selbst wenn sie auch von Gas durchströmt wird und deshalb einen größeren Teil des Steigrohres einnimmt. Vielmehr kann erst dann eine Druckverminderung eintreten, wenn ein Ausfluß der Säule erfolgt.

Zu III. Nach diesen Bemerkungen kann es nicht Wunder nehmen, daß die Erscheinungen in Wirklichkeit sich ganz

---

1) Blümcke: Analen der Physik, 1884. Tabelle pag. 412.

anders darbieten, als man auf Grund dieser Theorie erwarten sollte. Ich verweise nur auf die folgenden allgemeinen Punkte:

1. Anstatt einer langsamen und stetigen Aufwärtsbewegung des Wasserspiegels bis zum Überfließen zeigt derselbe ungefähr 30 Minuten vor Beginn des Ausbruches ein plötzliches Steigen, fällt darauf wieder langsam, steht einige Minuten ganz ruhig, um dann erneut plötzlich aufgetrieben und zum Ausfluß gebracht zu werden.

2. Statt daß die größte Höhe des ausgeschleuderten Wasserstrahles erst in der 150.—200. Sekunde erreicht wird, liegt sie bereits innerhalb der ersten 60 Sekunden[1]).

3. Nach der Theorie sollte man erwarten, daß, wenn einmal ein erster Ausbruch stattgefunden hat, dann auch die folgenden Ausbrüche stets dieselben Formen, was Höhe des Strahles und Dauer anbelangt, annehmen müssen; denn wenn erst durch die Verdrängung der Kohlensäure die Säule zum Ausfluß gebracht und damit nach Henrichs Anschauung der Ausbruchsmechanismus in Gang gesetzt ist, dann muß der Prozeß auch notwendig zu Ende gehen, vorausgesetzt natürlich, daß die Grundlagen der Theorie richtig sind und der aus dem aufsteigenden Wasser freiwerdenden Kohlensäure die Rolle gebührt, die ihr die Theorie zuweist. Dem gegenüber aber sei auf die im August 1912 beobachteten Erscheinungen hingewiesen. Diese sind bei Annahme einer einzigen sättigenden Kohlensäureader nicht zu erklären; denn warum tritt, wenn die in Folge der Druckverminderung aus dem Wasser entweichende Kohlensäure wirklich der Träger des eingeleiteten Ausbruches ist, eine deutliche Pause nach der ersten Phase ein, die doch nach Henrich nur mit einer plötzlich geringer werdenden Gasentbindung aus dem Wasser erklärt werden könnte?

Zu IV. Wenn nun auch die spezielle Theorie des Namedysprudels von Henrich nicht mit den wirklichen Verhältnissen übereinstimmt, kann dann nicht wenigstens das ihr zu Grunde

---

1) Vergl. Fig. 10.

liegende allgemeine Prinzip von der Auftreibung einer Wassersäule durch die nach der Sättigung frei aufsteigende Kohlensäure für die Erklärung des Namedysprudels herangezogen werden? Es wäre ja denkbar, daß die Theorie doch zu einem brauchbaren Resultate führt, wenn sie nur den tatsächlichen Verhältnissen, wie sie aus dem Bohrbericht und meinen eigenen Beobachtungen und Messungen folgen, angepasst wird. Dazu gehört also vor allem, daß man nicht eine sättigende Ader, sondern deren mehrere annimmt. Dann könnte man die Ursache der Zweiphasenausbrüche vom August 1912 darin finden, daß die Sättigung der unteren Säule infolge irgend einer Umlagerung in den kohlensäureführenden Spalten langsamer erfolgt, als die der oberen Säule. Es würde also bei einem Ausbruch aus dem oberen Bohrlochteil die darunter befindliche Wassersäule erst viel später ihre Kohlensäure entbinden als sonst, weil sie ja noch garnicht für den ihrer Tiefe entsprechenden Druck gesättigt ist, sodaß der aufsteigende Strahl eine Abschwächung erfahren muß, wenn das über der oberen Ader befindliche Wasser ausgeschleudert ist. Dann aber kann die bei diesen Ausbrüchen besonders stark auftretende Erscheinung nicht erklärt werden, daß in der ganzen Zwischenzeit aus dem Wasserspiegel viel Kohlensäure entbunden wird und das Aufsteigen der Wassersäule vor einem Ausbruch immer noch plötzlich, wenn auch etwas langsamer erfolgt. Denn das aus dem Wasserspiegel entbundene Gas muß wegen der Abdichtung gegen das Grundwasser mindestens aus 92 m Tiefe kommen; von dieser Tiefe ab bis zur Oberflöche muß also die Säule unbedingt gesättigt sein, wenn sie in der Zwischenzeit andauernd Kohlensäureblasen durchläßt. Das plötzliche Ansteigen des Wasserspiegels vor einem Ausbruch könnte man dann so erklären, daß in diesem Augenblick die ersten Gasblasen aus dem unterhalb 92 m befindlichen Teile der Säule nach dessen Sättigung nun in den oberen gelangen, und ohne absorbiert zu werden in ihm aufsteigen. Sie erfüllen also jetzt ziemlich plötzlich nicht nur den unteren, sondern auch den oberen Teil der Säule, und werden dementsprechend den Wasserspiegel der Säule heben können. Damit wäre also das schnelle Ansteigen vor einem Ausbruch und die Kohlensäureentbindung in der Zwischenzeit erklärt, aber gleich-

zeitig ist die Voraussetzung für das Zustandekommen der Zweiphasenausbrüche nicht mehr erfüllt, die ja darin bestand, daß der untere Teil der Wassersäule noch ungesättigt sein soll, während im oberen die Absorption bereits abgeschlossen ist.

Daraus folgt also, daß selbst der Versuch einer den tatsächlichen Verhältnissen angepaßten Theorie auf Grund des Henrichschen Prinzips von der Auftreibung einer Wassersäule durch die nach der Sättigung frei aufsteigende Kohlensäure die Erscheinungen des Namedysprudels nicht zu erklären vermag.

Eigene Erklärung.

§ 10. Theorie des Namedysprudels auf Grund der Messungen vom 21. Dezember 1912, 12. bis 15. März, 29. Mai 1912.

Der Kernpunkt der ganzen Frage ist also der: Warum findet zu bestimmten Zeiten ein Ausbruch statt, oder speziell für den Namedysprudel, warum zeigt der Wasserspiegel zu bestimmten Zeiten eine plötzliche starke Aufwärtsbewegung, die meist zum Ausbruch führt? Nach den vorhergehenden Überlegungen kann die Ursache nur die sein, daß plötzlich größere Gasmengen als gewöhnlich in das Bohrloch eintreten und in ihm aufsteigen. Da irgend welche Hohlräume, also rein zufällige Bedingungen im Gestein, wie oben auf Seite 39 und 40 auseinandergesetzt, nicht in Frage kommen, so folgt daraus die Aufgabe, diese Erscheinungen aus den überall gegebenen Bedingungen, am besten ohne irgendwelche spezielleren Annahmen zu erklären. Schon daraus, daß der Sprudel nicht ständig springt, folgt ohne weiteres, daß das treibende Gas nur zu gewissen Zeiten im Stande ist, den Druck der auflastenden Wassersäule zu überwinden. Es wechselt also der Druck des Gases (jedenfalls in der Umgebung des Bohrloches) periodisch in der Zwischenzeit beständig von einem Minimum zum Maximum. Die Periodizität dieser Erscheinung kann nun nicht allein in dem Gas selbst liegen, sondern sie muß noch durch einen anderen Umstand bedingt sein, und dieser Umstand ist der schwankende Druck der Wassersäule. Daraus nämlich, daß bei einem Ausbruch mehr Wasser ausgeworfen wird, als in

derselben Zeit aus den wasserführenden Schichten und Spalten zufließt, ergibt sich eine Verminderung des Wasserdruckes im Bohrloch gegen Ende des Ausbruches; dementsprechend wird jetzt durch die gasführenden Spalten dem Bohrloch mehr Kohlensäure als sonst zuströmen. Wenn nun deren Abstrom aus dem weiten Bohrloch viel größer ist als der Zustrom aus den engen gasführenden Spalten, so muß sich notwendigerweise nach einer gewissen Zeit der Gasvorrat in der Umgebung des Bohrloches soweit erschöpft haben, daß ein weiterer Abstrom durch einen entgegenwirkenden Druck, der nur wenig größer zu sein braucht, verhindert werden kann. Dieser Druck wird erzeugt von der Wassersäule, die sich langsam durch Zufluß aus dem Gestein im Bohrloch wieder ergänzt. Aber die Gasadern werden nicht nur verschlossen, sondern das Wasser dringt auch noch eine beträchtliche Strecke in sie ein, da ja dessen Druck so lange zunimmt, bis der Wasserspiegel nicht mehr steigt. Die eigentliche Ursache des Intermittierens der Sprudel liegt also in dem Mißverhältnis zwischen dem Auswurf und dem Zustrom des Wassers; wir folgern daraus, daß es dann auch möglich sein muß, das Intermittieren zu beseitigen, wenn der Abstrom des Wassers so reguliert wird, daß er gleich dem Zustrom wird. In der Tat gelingt es durch geeignete engere Verrohrung einen intermittierenden Sprudel in einen kontinuirlichen zu verwandeln[1]). Meist genügt auch schon ein engerer Aufsatz auf das Steigrohr. So springt die Quelle I des „Tönisteiner Sprudels“ aus einem 300 mm weiten Rohr intermittierend alle 1—1½ Stunden rund 3 m hoch, dagegen schleudert sie bei einer eingesetzten Fassung von nur 50 mm Weite einen 7—8 m hohen Wasserstrahl ununterbrochen empor.

Welche Annahmen liegen dieser Theorie zu Grunde? Keine, die nicht aus den beobachteten Tatsachen folgte. Denn daß der Wasserdruck nach einem Ausbruch abgenommen hat, folgt aus den Messungen, wonach der Wasserspiegel tief in das Bohrloch hinabsinkt; und dass der Druck des Gases periodisch schwankt, folgt einfach daraus, daß der Sprudel nicht beständig springt

1) Lepsius, Festschrift zur Weihe des neuen Solsprudels zu Bad Nauheim, pag. 11. Darmstadt 1900.

und andere Erklärungsmöglichkeiten nicht zutreffen. Doch bedarf dieser Punkt noch einer näheren Erklärung.

Auf ihrem Wege zum Bohrloch muß die Kohlensäure ein verwickeltes System von Spalten durchwandern. Ist nun durch einen Ausbruch das Bohrloch ganz oder teilweise von Wasser befreit, so wird sich die Wirkung der dadurch entstehenden Druckverminderung in den Spalten mit zunehmender Entfernung vom Bohrloch immer weniger bemerkbar machen, d. h. es läßt sich ein gewisses Gebiet um den Sprudel angeben, außerhalb dessen ein Ausbruch auf die Bewegung der Kohlensäure im Gestein keinen Einfluß mehr hat. In diesem „Außengebiet" ist daher die Stärke des Gasstromes im allgemeinen keinen Schwankungen mehr unterworfen und allein abhängig von dem Druck, mit welchem die Kohlensäure von ihrem Ursprungsorte her in die Spalten gepreßt wird.

Demzufolge erklären sich die auf Seite 28 geschilderten Erscheinungen wie folgt:

Gemäß der Durchschnittsdauer der Zwischenzeiten überwindet alle 4—6 Stunden der Druck des zum Bohrloch gepreßten Gases den der auflastenden Wassersäule. Das in dieser Zeit stattfindende langsame Aufsteigen des Wasserspiegels hat neben dem hydrostatischen Druck, auf Grund dessen er sich dem allgemeinen Grundwasserspiegel nähert, seine Ursache darin, daß die Kohlensäure bei der Bewegung zum Bohrloch in den Spalten das absperrende Wasser vor sich herschiebt und dieses langsam in das Bohrloch drückt. Ohne zunächst das ungefähr 30 Minuten vor dem Ausbruch stattfindende Steigen und Fallen des Wasserspiegels zu erklären, können wir dann weiter sagen, daß es einen Augenblick geben muß, in dem alles Wasser aus den Spalten verdrängt ist und die Kohlensäure in das Bohrloch strömen kann. Die vorher langsame Aufwärtsbewegung des Wasserspiegels muß plötzlich in eine mehr oder minder rasche übergehen, da das Gas in dem Maße wie es aufsteigt sich ausdehnt und ein immer größeres Wasservolumen verdrängt und zum Bohrloch hinauspreßt. Je kürzer aber die auflastende Wassersäule wird, umso geringer ist der dem Gasstrom entgegenwirkende Druck, sodaß immer größere Mengen Kohlensäure in das Bohrloch gepreßt werden. Hat auf

diese Art und Weise die Aufwärtsbewegung der Säule und der Ausfluß einmal eingesetzt, so muß sie, da ihre einzelnen Teile fortwährend unter geringeren Druck kommen, ihrerseits Gas entbinden und dadurch den Ausbruch unterstützen. Der Wasserstrahl verschwindet wieder im Bohrloch, d. h. der Ausbruch geht zu Ende, wenn entweder die Wassermenge im Steigrohr so gering geworden ist, daß sie zur Strahlbildung nicht mehr ausreicht, oder wenn die auftreibende Kraft des Gases sich erschöpft hat. Da aber im allgemeinen in Namedy nach dem Wasserausbruch noch 6—7 Minuten lang Gas ausgeworfen wird, so folgt daraus, daß unter gewöhnlichen Verhältnissen die Menge der Kohlensäure ziemlich beträchtlich sein muß. Sie ist sogar manchmal so groß, daß die in das Bohrloch eindringenden Wassermassen von dem immer noch aufsteigenden Gasstrom ergriffen und aus dem Steigrohr geschleudert werden (Nachausbruch). Wenn trotzdem aber schließlich der Gasausbruch zu Ende geht und der Wasserspiegel wieder sichtbar wird, so zeigt das nach unserer Theorie an, daß der immer schwächer werdende Druck des Gases dem wachsenden Druck der sich ergänzenden Wassersäule nicht mehr stand zu halten vermag und das Gas daher in seine Spalten zurückgepreßt wird. Obwohl also jetzt kein Gas mehr in das Bohrloch eindringen kann, so ist dennoch der Wasserspiegel gerade in der ersten Zeit nach dem Ausbruch stark von Kohlensäureblasen beunruhigt; das ist aber einfach die Folge davon, daß das Wasser im oberen Steigrohr zuvor in einer Tiefe von mindestens 92 m (denn bis dahin geht die Abdichtung gegen das Grundwasser) mit dem Gas in Berührung gekommen ist und sicherlich mehr von ihm aufgenommen hat, als seinem jetzigen Drucke entspricht; es wird also seinen Überschuß an Kohlensäure abgeben. (So kommen wir theoretisch gerade zu der entgegengesetzten Ansicht über den Kohlensäuregehalt des Wassers nach einem Ausbruch wie Henrich; vergl. S. 48; nur unsere Ansicht entspricht den Beobachtungen). Gleichzeitig steigt der Wasserspiegel erst noch schneller, dann immer langsamer an entsprechend dem herrschenden Grund- bezw. Rheinwasserstand, während tief unten in den kohlensäureführenden Spalten das Gas noch immer weiter zurückgepreßt wird, bis mittlerweile sein Druck durch

neuen Zustrom stark genug geworden ist, den Wasserdruck zu überwinden und das Wasser langsam aus den Spalten wieder heraus zu drängen. So bereitet sich dann ein neuer Ausbruch vor.

Um die hier entwickelte Ansicht auf ihre Richtigkeit zu erproben, versuchte ich sie durch einen geeigneten Apparat praktisch darzustellen, worüber im nächsten Abschnitt berichtet werden soll.

---

§ 11. Experimentelle Bestätigung der Theorie.

Der Apparat stimmte im wesentlichen mit dem zur Erprobung der Henrichschen Theorie benutzten überein, nur mußten natürlich an der Kohlensäurezuführung entsprechende Veränderungen vorgenommen werden. Da nach den im vorigen Abschnitt entwickelten Ansichten der Kohlensäurezustrom bis auf eine gewisse Entfernung vom Bohrloch als konstant anzusehen ist, schaltete ich zwischen dem Reduzierventil der Bombe und dem Steigrohr eine feine Kapillare K_2 (Fig. 4) und gleichzeitig zur Demonstrierung des Spaltensystems ein mehrfach spitzwinklig gebogenes Rohr von 1,2 cm Durchmesser und rund 0,3 l Inhalt (wie z. B. ON in Figur 4) ein. Doch zeigte sich bei diesen ersten Versuchen, daß die in diesem Rohr sich ansammelnde Kohlensäuremenge zu klein war, um beim Eindringen des Gases in das Steigrohr einen genügenden Ausfluß zu erzeugen, war sie doch das alleinige treibende Agens, da die Wassersäule AB nicht mit Gas gesättigt war, und daher von ihr aus der einmal eingeleitete Ausbruch nicht unterstützt wurde. Darum brachte ich zwischen der Kapillaren und dem gebogenen Rohr ein gußeisernes Gefäß von rund 2 l Inhalt so an, daß die aus der Kapillaren strömende Kohlensäure sich erst in diesem Gefäß sammeln mußte, bevor sie in das gebogene Rohr und dann in das Steigrohr eintreten konnte. Jetzt zeigte sich auch die erste intermittierende Erscheinung, wenngleich im einzelnen natürlich von irgend welcher Übereinstimmung mit Namedy nicht die Rede sein konnte. Doch war damit jedenfalls die

Möglichkeit des Prinzips erwiesen, sodaß ich jetzt daran denken konnte, die weiteren Einzelheiten der Theorie darzustellen.

Einen gewissen Abschluß in den Untersuchungen stellte folgende Anordnung dar. Das neue an ihr war vor allem die Sättigungsvorrichtung (III. Fig. 4). Um nämlich den wirklichen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen, wurde das Wasser, bevor es in das Steigrohr eintrat, mit Kohlensäure gesättigt, und zwar unter dem Druck der ungefähr 10 m hohen Wassersäule GH. Dieser Vorgang vollzog sich in einem 65 cm hohen und 10 cm weiten Glascylinder, der an seinen beiden abgeschliffenen Enden durch zwei Messingplatten mit Gummidichtung in geeigneter Weise verschlossen war. Die obere Platte enthielt zwei Hähne, E und F; von E führte ein U-förmig gebogenes Glasrohr in das Innere als Fortsetzung der Druckleitung GH. Die untere Messingplatte trug eine besondere Vorrichtung zum Erzeugen kleiner Gasblasen, die das in dem Cylinder befindliche Wasser sättigen sollten. Diese bestand aus einem 2 cm hohen Metallcylinder von 9,5 cm Durchmesser, dessen oberer Deckel mit einer großen Anzahl feiner Löcher versehen war. Gleich darunter lag eine 0,5 cm dicke Filzschicht, die durch eine zweite ebenfalls fein durchlochte und an der inneren Mantelfläche des Cylinders angelötete Metallplatte gegen diesen Deckel gepreßt wurde. Aus diesem Messingcylinder und dem Glasbehälter führt ein Doppelrohr nach außen, wie es Figur 4 angibt; und zwar stellt der eine Abzweig eine Verbindung des Sättigungsraumes mit dem Steigrohr her, der andere dient zur Zuleitung der Kohlensäure. Durch Anwendung dieser Sättigungsvorrichtung wurde einmal erreicht, daß der zur Sättigung nötige Druck nicht besonders erzeugt werden mußte, sondern sich aus der Länge der Wassersäule in dem Druckrohr von selbst ergab; zweitens gelang es dadurch, daß das Gas durch den Filz gehen mußte, auf einfache Art so kleine Blasen herzustellen, wie man sie durch noch so fein gebohrte Löcher nie, durch eine entsprechende Anzahl von Kapillaren (es hätten über 50 sein müssen) nur unter großen Schwierigkeiten hätte erzeugen können. Das Rohr zur Zuleitung der Kohlensäure wurde unter Zwischenschaltung eines Hahnes D mit Skala mit der Bombe verbunden, während das gesättigte Wasser nach Passieren des

Hahnes C bei A' in das Steigrohr trat. Zwischen R und A wurde noch ein ungefähr 60 cm langes vertikal abwärts gehendes U-Rohr angebracht. Dazu veranlaßte mich die Erwägung, daß in der Wirklichkeit der Druck des in den Spalten befindlichen Gases vor einem Ausbruch nicht nur gleich dem Druck des auflastenden Wassers, sondern sicherlich größer sein muß, da ja die dem Bohrloch zuströmende Kohlensäure einen mehr oder minder langen Wasserpfropfen vor sich herschiebt, dessen Reibung an den Gesteinswänden ziemlich beträchtlich ist. Diese Drucksteigerung wurde in einfacher Weise durch das U-Rohr erzeugt. Zwar entstanden auch ohne dasselbe Ausbrüche, doch ging denselben ein längeres Überfließen des Wassers über den oberen Steigrohrrand vorauf. Das U-Rohr bedeutet also für die Darstellung der Theorie nichts prinzipielles, sondern dient lediglich zur Erzeugung von schärfer einsetzenden Ausbrüchen. Bei einem Abstand des Wasserspiegels im Druckgefäß I von der Oberkante des Rohres AB (Fig. 4) von 20 cm trat rund alle 8 Minuten ein Ausbruch von ungefähr 30 Sekunden Dauer auf; dabei floß das Wasser zunächst bis zu 10 Sekunden ziemlich ruhig über, dann stieg der Strahl schnell, bis er nach rund 20 Sekunden seine größte Höhe erreichte und war nach 30 Sekunden fast stets wieder im Steigrohr verschwunden. Unangenehm bei dieser Anordnung war aber, daß der geringe Durchmesser des Steigrohres das Entstehen großer, den ganzen Querschnitt ausfüllender Blasen begünstigte, die bei einem Ausbruch insofern recht störend wirkten, als bei ihrem Erscheinen an der Steigrohrmündung während und nach dem Maximum der Wasserstrahl nicht mehr einheitlich austrat, sondern mannigfach zerrissen und unterbrochen. (Entsprechend große Blasen habe ich beim Namedysprudel niemals beobachtet, nur war aus dem gegen Ende eines Ausbruches deutlich sichtbaren Pulsieren des Strahles zu erkennen, daß gewisse Teile der aufsteigenden Säule bedeutend gasreicher sind als andere). Diese Störung glaubte ich durch Anwendung eines weiteren Steigrohres beheben zu können und baute daher ein solches von 2,4 bis 2,6 cm Durchmesser und rund 10 m Länge und dementsprechenden Inhalt von rund 4,9 l ein. Natürlich mußte auch das Ansammlungsgefäß für die Kohlensäure im selben Maße vergrößert

werden. Es zeigte sich, daß zur Erzeugung solcher Ausbrüche, bei denen der Wasserstrahl bis 1,5 m hoch geschleudert wurde, ein Gefäß von rund 8,7 l Inhalt erforderlich war. Bei den mit dieser Anordnung angestellten Versuchen ergab sich aber, daß auch die weiten Rohre die Bildung großer Blasen zuließen; zu noch größeren Querschnitten überzugehen, erschien aus verschiedenen Gründen nicht angebracht. Auch ein Versuch, die Bildung großer Blasen dadurch zu verhindern, daß die Kohlensäure bei A durch ein mit feinen Löchern versehenes Rohr in das Steigrohr strömte, zeitigte ebenfalls keinen Erfolg; denn von den anfangs gebildeten kleinen Gasblasen vereinigten sich bald mehrere zu einer großen, die den ganzen Querschnitt ausfüllte und infolge geringerer Aufwärtsbewegung, verursacht durch die Reibung an den Wänden, die nachfolgenden kleineren und darum ohne Reibung schneller aufsteigenden Blasen aufschluckte.

Bei einem solchen Ausbruch wurde durchschnittlich die Hälfte des Steigrohrinhalts ausgeschleudert; der Einfachheit halber nehmen wir 2,25 l an. Die Menge der Kohlensäure, die zur Hebung dieser Wassermenge notwendig ist, berechnet sich daraus folgendermaßen: Vor einem Ausbruch stand das Gasvolumen von 8,7 + 0,3 l (aus dem Rohr NO), also im ganzen 9 l, unter dem Druck der Luft + 10 m Wassersäule, also rund 2 Atm.; nach dem Ausbruch war der Druck auf rund 1,5 Atm. gesunken, da ja das Steigrohr zur Hälfte entleert war, und es müßte daher, unter Vernachlässigung der in dieser Zeit bei M und H_2 neu eingeströmten Kohlensäure das Gas ein Volumen von

$$v = \frac{v_0 \cdot p_0}{p} = \frac{9 \cdot 2}{1{,}5} = 12\,l$$

eingenommen haben, d. h. 3 l Kohlensäure, gemessen bei 1,5 Atm. bezw. 4,5 l bei 1 Atm. werden ausgeströmt sein. Die bei einem Ausbruch wirkende Gasmenge hat also rund ein doppelt so großes Volumen wie die mit emporgerissene Wassermenge. Dabei ist natürlich die Wirkung der im Wasser absorbierten Kohlensäure garnicht in Betracht gezogen. Auf Grund dieser experimentell gefundenen Beziehung werden wir später für den Namedy-Sprudel eine obere Grenze für den von den Spalten gebildeten notwendigen Kohlensäureansammlungsraum berechnen.

Weitere Einzelheiten über die Zwischenzeiten und die Ausbrüche gibt die nachstehende Tabelle:

	Anfang des Ausbruches	Ende des Ausbruches	Dauer	Zwischenzeit
6. VIII. 12				
I.	10 h 33 m	10 h 33 m 50 s	50 s	
				19 m 30 s
II.	10 h 55 m 20 s	10 h 56 m 5 s	45 s	
				23 m 5 s
	11 h 19 m 10 s	11 h 19 m 55 s	45 s	
				25 m 10 s
	11 h 45 m 5 s	11 h 45 m 55 s	50 s	
				24 m 5 s
	12 h 10 m	12 h 10 m 50 s	50 s	

Höhe des Strahles in cm:

t	I	II	III	IV
5 s	2	2	8	2
10 s	4	3	13	4
15 s	5	5	25	6
20 s	10	10	50	12
25 s	25	25	100	40
30 s	60	60	60	70
35 s	70	70	30	50
40 s	30	40	15	25
45 s	30	—	—	15
50 s	20	—	—	—
55 s	—	—	—	—

Die Zahlen zu I und II gehören zu den am 6. VIII. beobachteten beiden ersten Ausbrüchen; III und IV wurden am 3. VIII. gemessen.

Vor dem Ausbruch stand der Wasserspiegel rund 20 cm unter der Oberkante des Steigrohres. Die Aufwärtsbewegung

vor einem Ausbruch geschah ziemlich schnell, wenn die Kohlensäure vor dem Eintritt in das Steigrohr das U-Rohr passieren mußte. Wurde dieses ausgeschaltet, so entstand trotzdem ein Ausbruch, doch stieg dann der Wasserspiegel langsamer auf und floß auch bis zu 30 Sekunden über, ehe die Strahlbildung begann. In diesem Falle betrug die ganze Dauer eines Ausbruches rund 2 Minuten. Rein zufällig bildete sich am Apparat eine Erscheinung aus, die ich auch in Namedy beobachtete, nämlich das Steigen und Fallen des Wasserspiegels einige Zeit vor dem Ausbruch; das kam so zu Stande: wenn nach Schluß eines Ausbruches das Wasser in die kohlensäureführenden Glasrohre eindrang, dann sammelten sich in ihnen an einigen Stellen Gasblasen an. Diese wurden kurz vor dem folgenden Ausbruch von dem wieder in das Steigrohr zurückgepreßten Wasser mitgeführt, stiegen auf und entwichen unter Hebung und Beunruhigung des Wasserspiegels in die Luft; entsprechend kann man sich auch dieselbe Erscheinung am Namedysprudel erklären, und dies bedeutet eine neue Stütze für die Richtigkeit der hier dargelegten Theorie, zumal eine andere ungezwungene Deutung dieser auf den ersten Blick seltsamen Vorgänge vor einem Ausbruch sich nicht leicht wird finden lassen. Wie die Tabelle zeigt, schwankt die Dauer der Zwischenzeiten (gerechnet vom Ende des 1. bis zu Anfang des 2. Ausbruches) von $19^m\,30^s$ bis $25^m\,10^s$, sie beträgt im Mittel also rund 23 Minuten, die der Ausbrüche von 45^s bis 50^s; d. h. die Dauer der Ausbrüche verhält sich zu der der Zwischenzeiten wie ungefähr 1 : 27, während bei Namedy unter Annahme einer $4\frac{1}{2}$stündigen Zwischenzeit und eines 5 Minuten dauernden Ausbruches das gleiche Verhältnis 1 : 54 ist. Da es aber ohne weiteres einleuchtet, daß bei einer derartigen Darstellung der natürlichen Verhältnisse der Annäherung an die Wirklichkeit eine bestimmte Grenze gesetzt ist, so wird man dies Resultat immerhin als ganz günstig bezeichnen können. Das gilt aber nicht von der Darstellung eines Ausbruches an und für sich in Bezug auf die Lage des Maximums des ausgeschleuderten Wasserstrahles innerhalb der Ausbruchszeit. Ergibt sich doch, daß es stets in der zweiten Hälfte, manchmal sogar erst nach dem 2. Drittel auftritt, während es in Wirklichkeit stets im ersten Fünftel liegt. Diese

Erscheinung zu erklären und praktisch darzustellen hat eine geraume Zeit in Anspruch genommen; manche durchaus richtig scheinende Annahme wurde durch dementsprechend angestellte Versuche widerlegt. Wenn auch eine volle Annäherung an die Wirklichkeit nicht erstrebt werden konnte, so mußte es dennoch bei richtiger Erkenntnis der tatsächlichen Verhältnisse möglich sein, das Maximum zum mindesten in die erste Hälfte der Ausbruchszeit zu verlegen. Schließlich kam ich zu der Ansicht, daß die Tätigkeit der verschiedenen Kohlensäureadern auf den Verlauf eines Ausbruches Einfluß haben könnte, indem z. B. die obere Ader bei 106 m zuerst den 20—30 Sekunden dauernden Ausfluß und vielleicht auch den ersten Teil der Strahlbildung erzeugt, und daß dann die mittlere Ader bei 218 m infolge der durch die obere Ader bewirkten Druckentlastung ziemlich schnell ihre größte Wirkung ausüben kann. Um diese Verhältnisse näher zu untersuchen, baute ich also eine zweite Kohlensäurezuführung in einer Höhe von 3,5 m unter der Steigrohroberkannte ein. Sie wurde mit der unteren Ader und dem Sättigungsapparat zusammen aus derselben Bombe gespeist. Die weitere Anordnung ergibt sich aus Fig. 4.

Wenn es nun gelang, den Zustrom zu den beiden Kohlensäureadern so zu regulieren, daß aus der oberen Zuführung eine gewisse Zeit vor der unteren Gas in das Steigrohr gepreßt wurde, so wurde zunächst der obere Teil der Wassersäule ausgeschleudert, unter Erreichung einer Maximalhöhe von 30 bis 40 cm. Inzwischen war auch die untere Ader in Tätigkeit getreten, konnte aber selbst im günstigsten Falle, wenn sie nur 5—8 Sekunden später zu wirken begann als die obere, nicht verhindern, daß der Strahl bis auf 10, ja 5 cm zurückging, da die obere Ader bereits zu erschöpft war, um den Strahl noch auf seiner Höhe halten zu können. Dann aber stieg derselbe schnell höher und höher, bis auf 1 m, ja 1,20 m, um darauf unter Ausstoßung großer Blasen mannigfach zerrissen wieder abzusteigen und im Steigrohr zu verschwinden. Wenn aber statt 5—8 Sekunden die untere Ader 15 Sekunden später zu wirken begann, dann setzte der Ausbruch nach Entleerung der oberen Wassersäule eine zeitlang vollkommen aus, um dann in erheblich kleinerem Umfange zu Ende geführt zu werden.

Meistens war das letztere der Fall, da die genaue Regulierung des Kohlensäurezustromes sehr schwierig war.

Die deutliche Abgrenzung der Phasen, die ich in Namedy selbst bis dahin nie beobachtet hatte, versuchte ich auf Vorschlag von Herrn Professor Richarz dadurch zu beseitigen, daß ich die obere Zuleitung tiefer legte, damit der durch sie bewirkte Ausbruch stärker würde und die dadurch bedingte größere Druckentlastung die untere Ader veranlassen sollte, das Gas früher als bisher und mit um so größerer Wucht in das Steigrohr zu pressen und damit eine Unterbrechung des Strahles zu verhindern. Diese Zuführung wurde in einer Höhe von 5,10 m unter der Steigrohroberkante angebracht und der zugehörige Kohlensäuresammlungsraum auf 6,5 l vergrössert. Zwar zeigte sich eine Besserung der Ausbruchserscheinungen; doch das Zurücksinken des Strahles nach der ersten Phase war noch deutlich zu beobachten. Nun konnte aber am Namedysprudel selbst ein Umstand mitspielen, der das wirkliche Bestehen zweier Phasen verschleierte: die hebende Kraft der während des Ausbruches aus dem Wasser entbundenen Kohlensäure, die bei dem Apparat trotz der vorher erfolgten Sättigung des Wassers immer noch sehr gering war. Es schien nicht ausgeschlossen, daß die Menge dieser Kohlensäure in Namedy groß genug war, den ausgeschleuderten Strahl nach Schluß der ersten Phase so lange auf seiner Höhe zu halten, bis das unten einströmende Gas seine volle Wirkung entfalten konnte. Trotzdem hätte es aber bei genauer Beobachtung gelingen müssen, während des einen oder anderen Ausbruches wenigstens die Andeutung zweier Phasen an dem ausgeschleuderten Wasserstrahl festzustellen. Um also diese Verhältnisse aufzuklären, besuchte ich den Sprudel noch einmal am 16. und 17. August 1912. Wie aus den bereits auf Seite 34 mitgeteilten Beobachtungen folgt, erwies sich meine Vermutung als richtig, daß, wenn wirklich die verschiedenen Kohlensäureadern den Verlauf eines Ausbruches bestimmen, dann unter besonderen günstigen Umständen eine Grenze zwischen den einzelnen Phasen bemerkbar sein muß. Vergleicht man nämlich diese zuletzt beobachteten Erscheinungen am Sprudel speziell hinsichtlich des Ausbruches mit den am Apparat gemachten Erfahrungen, so zeigt sich dabei eine Über-

einstimmung, wie sie deutlicher kaum gewünscht werden kann. Denn sowohl die Wirklichkeit wie der Versuch weisen zwei deutlich getrennte Ausbruchsphasen auf; hier wie dort werden von dem ausgeschleuderten Wasserstrahl anfangs nur mittlere Höhen, dann nach einem mitunter sehr tiefen Absteigen plötzlich unter starker Aufwärtsbewegung die größten Höhen erreicht. Hiernach erscheint es gerechtfertigt, dem durch das Experiment gegebenen Fingerzeige folgend, den Schluß zu ziehen, daß auch beim Namedysprudel der Verlauf eines Ausbruches bedingt ist durch die verschieden starke Tätigkeit der in verschiedener Tiefe angebohrten Kohlensäureadern. Im einzelnen ist also die Annahme zu machen, daß, wie es auch beim Apparat der Fall ist, der obere Kohlensäurezustrom in der Hauptsache einen Ausfluß und schwächeren Ausbruch der bis 106 m herabreichenden Wassersäule bewirkt, während die stärkere bei 218 m den Hauptausbruch verursacht und den Strahl bis zur größten Höhe emporschleudert.

Gleichzeitig aber mit dieser Erkenntnis sah ich auch ein, daß diese Tätigkeit der beiden Adern in ihrer Bedeutung für die Lage des Maximums bei einem Ausbruch nicht überschätzt werden darf, daß vielmehr noch ein Punkt, den ich bisher nicht berücksichtigt hatte, eine anscheinend noch viel größere Rolle spielt, das ist nämlich die Art der Verrohrung. Denn aus den Versuchen am Apparat geht hervor, daß erst dann der Strahl die höchsten Höhen erreicht, wenn große Gasmengen sich der Oberfläche nähern und den auf ihnen lastenden Teil der Wassersäule mit großer Gewalt emporheben. Große Gasmengen treten aber nur bei entsprechender Druckverminderung, entstanden durch eine hinreichende Verkürzung der Wassersäule, in das Bohrloch ein. In dem Augenblick des Maximums muß daher bei einfacher Verrohrung das ganze Bohrloch oder im Falle einer doppelten Verrohrung jedenfalls das innere Steigrohr ziemlich wasserfrei geworden sein. Im ersten Falle muß dann der Ausbruch nach dem Maximum schnell zu Ende gehen, wie es bei meinem Apparat auch der Fall war. Wenn nun beim Namedysprudel die Ausbruchszeit nach dem Maximum bei den alten Erscheinungen noch drei bis viermal so lang ist wie vor demselben, so liegt das daran, daß nach dem Erreichen der größten

Höhen der vorübergehend mehr oder minder gering gewordene Steigrohrinhalt von dem zwischen der inneren und der äußeren Verrohrung befindlichen Wasser wieder aufgefüllt und ausgeschleudert wird, vorausgesetzt, daß dazu noch genügend Kohlensäure zur Verfügung steht.

Unter Berücksichtigung dieser neuen und den bereits in § 8 dargelegten Resultaten der Untersuchung ergibt sich eine endgültige Theorie des Namedysprudels, die alle Erscheinungen ungezwungen zu erklären vermag.

---

§ 12. Endgültige Theorie des Namedysprudels.

Betrachten wir zunächst der Reihe nach die alten Erscheinungen, über die auf Seite 28 berichtet worden ist, mit der Vorbereitung eines Ausbruchs beginnend. Die langsam aufsteigende Bewegung des Wasserspiegels rührt her teils von der Wirkung des hydrostatischen Druckes, teils von der Kohlensäure, die in den Spalten dem Bohrloch zuströmt und den Weg versperrenden Wasserpfropfen in das Bohrloch drückt. Einige wenig ergiebige Gasadern haben genügenden Druck, andauernd Kohlensäure in das Bohrloch zu pressen; sie sind die Ursache, daß in der ganzen Zwischenzeit der Wasserspiegel mehr oder minder stark beunruhigt ist. Da sie höchstwahrscheinlich mit den Hauptadern in irgend einem Zusammenhang stehen, so ist es erklärlich, daß mit Annäherung an einen Ausbruch der Druck auch in ihnen stärker wird. Die daraus folgende stärkere Tätigkeit läßt den Wasserspiegel immer unruhiger werden. 30 bis 35 Minuten vor dem Ausbruch ereignet es sich, daß aus den kohlensäureführenden Spalten die ersten größeren Blasen in das Steigrohr gepreßt werden, die sich durch irgendwelche zufälligen geologischen Bedingungen innerhalb des Wasserpfropfens gebildet haben. Beim Erscheinen an der Oberfläche verursachen sie ein plötzliches Steigen und darauf folgendes Sinken des Wasserspiegels unter starker Kohlensäureentbindung. Haben die beiden Hauptkohlensäureadern bei 106 und 218 m den vor ihnen befindlichen Wasserpfropfen vollständig verdrängt,

so strömt aus ihnen Gas in das Steigrohr, sodaß der Wasserspiegel erneut ganz plötzlich zu steigen beginnt. Das anfangs bis zu 30 Sekunden Dauer erfolgende Überlaufen ist in der Hauptsache der Tätigkeit der oberen Ader zuzuschreiben; vielleicht bewirkt sie auch noch den ersten Teil der aufsteigenden Bewegung des Strahles, doch scheint sich auch bereits die untere Ader an diesen Erscheinungen zu beteiligen, wie sich noch weiterhin ergeben wird. Dann aber ist die im Steigrohr entstehende Druckverminderung so groß geworden, daß die untere Ader nun mit großer Gewalt in Tätigkeit tritt. Sie schleudert zunächst den im Steigrohr enthaltenen Wasserpfropfen aus und erfährt damit vorübergehend eine so große Druckentlastung, daß sie den Wasserstrahl schon nach ganz kurzer Zeit bis zu den größten Höhen emportreiben kann. Die damit verbundene starke Gasausströmung bewirkt aber bald eine entsprechende Druckabnahme in der Ader. Der Wasserstrahl steigt daher in der zweiten Minute abwärts und die Wasserschüttung ist nicht mehr so heftig, da sich der Wasservorrat im Steigrohr nur langsam durch seine perforierten Rohrwände aus der äußeren Verrohrung ergänzen kann. Wenn trotzdem in der dritten und teilweise auch noch in der vierten Minute der Wasserstrahl sich ziemlich auf einer Höhe hält, so muß man bedenken, daß einmal der aus dem gesättigten Wasser entweichenden Kohlensäure ebenfalls eine hebende Wirkung zukommt; dann aber darf auch — wenigstens bei diesen alten Ausbrüchen bis Mai 1912 — die unterste Kohlensäureader bei 267 m Tiefe nicht außer Acht gelassen werden; ihre Tätigkeit scheint jetzt zu beginnen. Mit der Zeit aber ist die Bohrlochentleerung so groß geworden, daß das in ihm enthaltene Wasser zur Strahlbildung nicht mehr ausreicht; daher muß schließlich der Wasserausbruch zu Ende kommen. Da aber anscheinend der Gasvorrat immer noch sehr groß ist, so folgt dem Wasserausbruch eine starke Gasausströmung, besonders stark vermutlich aus der obersten Ader bei 106 m, die ja erst als letzte von der wieder ansteigenden Wassersäule verschlossen wird. Diese aufsteigenden Gasmassen sind im Stande, das langsam zufließende Wasser, sobald es wieder in genügender Menge vorhanden ist, noch einmal mit sich emporzureißen und in mehr

oder minder heftiger Weise zum Ausfluß zu bringen. So entsteht der Nachausbruch. Wenn aber die Wassersäule groß genug geworden ist, um den weiteren, jetzt auch schwächer werdenden Gaszustrom zu unterbinden, muß der Wasserspiegel tief in das Steigrohr hinabsinken, da er jetzt von den immer weniger werdenden aufsteigenden Gasblasen nicht mehr getragen werden kann. Wenn nun auf Grund des hydrostatischen Druckes aus dem Gestein genügend Wasser in das Bohrloch eingetreten ist, muß der Wasserspiegel im Steigrohr wieder sichtbar werden, und zwar anfangs meist noch stark von aufsteigenden Gasblasen bewegt, wie auf Seite 29 näher ausgeführt worden ist. Da nun diese alten Ausbrüche bis Mai 1911 alle in einer Phase verlaufen sind, und sicherlich verschiedene Adern dabei tätig sind, muß daraus geschlossen werden, daß die Drucksteigerung in ihnen verhältnismäßig gleichzeitig erfolgt.

Natürlich erhebt sich sofort die Frage, was muß eintreten, wenn diese Gleichmäßigkeit der Drucksteigerung durch irgend welche Umstände gestört wird? Der Sprudel selbst hat darauf die Antwort gegeben, wie aus den Beobachtungen vom 16. und 17. August hervorgeht. Sehen wir uns zunächst einmal nach den Ursachen dieser Störung um. Wie auf Seite 35 mitgeteilt ist, zeigt das Wasser eine Temperaturabnahme von rund 1,5 Grad, die besonders im letzten Teil des Ausbruches und kurz nach demselben deutlich zu beobachten ist. Diese auffallende Tatsache könnte ihren Grund z. B. darin haben, daß kaltes Süßwasser unter Zerstörung der Abdichtung in das Bohrloch eingedrungen ist; dann müßte aber die Kohlensäureentbindung aus dem Wasserspiegel in der Zwischenzeit eher schwächer als stärker geworden sein. Viel wahrscheinlicher und durch das ganze Verhalten des Sprudels bestätigt ist aber die Annahme, daß die unterste Kohlensäureader durch irgend eine Ursache bei diesen neuen Ausbrüchen nicht mehr tätig ist, und infolgedessen die unteren wärmeren Wassermengen garnicht mehr ausgeschleudert werden. Dafür spricht einmal sehr deutlich die Tatsache, daß die Temperatur des Wassers gerade um soviel abgenommen hat, als dem Tiefenunterschied der beiden Adern entspricht; dieser ist nämlich rund 49 m, während die Wärmeabnahme des Wassers um 1,5 Grad C bei Annahme

einer geothermischen Tiefenstufe von 30 m auf einen solchen Unterschied von 45 m hinweist. Anderseits finden die kurzen Ausbrüche dadurch eine befriedigende Erklärung, daß man annimmt, daß die unter 218 m liegenden Teile des Bohrloches daran gar nicht mehr beteiligt sind[1]). Daß die hebende Kraft der unteren Ader bei 267 m bei den neuen Ausbrüchen höchstwahrscheinlich ausgeschaltet ist, zeigt die Kurventafel sehr deutlich, indem der Abstieg des Strahles jetzt viel schneller erfolgt als bei den alten Ausbrüchen. Die Folge dieser verkürzten Ausbruchsdauer wird aber sein, daß jetzt die obere Ader viel weniger lange von Wasser frei ist oder wenigstens weniger lange unter dem geringeren Druck der verkürzten Wassersäule steht als vorher, daß sie also auch verhältnismäßig weniger Gas vor allem nach dem eigentlichen Ausbruch ausströmen wird. Daher wird es auch unter diesen Umständen und bei gleichbleibendem Kohlensäurezustrom jetzt nicht mehr so lange dauern, bis der Druck in dieser oberen Ader wieder stark genug geworden ist, um die auflastende Wassersäule zu heben; die Zwischenzeiten müssen kürzer werden, wie es ja auch tatsächlich beobachtet wurde.

Wenn nun wirklich die Gasausströmungen nach einem Ausbruch in erster Linie aus der oberen Ader erfolgt sind, so muß die ausströmungshemmende Wirkung dieser kürzeren Ausbrüche sich z. B. auf die mittlere Kohlensäureader bei 218 m weniger bemerkbar machen, als auf die obere. Sie wird daher nicht viel weniger Kohlensäure ausströmen als bei den alten Ausbrüchen, bei denen ihr 4—6 Stunden Zeit zur Erholung zur Verfügung standen. Daher wird der Ausbruch aus der oberen Ader früher beginnen können als aus der mittleren. Die Folge davon wird sein, daß das Ansteigen des Wasserspiegels vor einem Ausbruch viel langsamer erfolgt, als wenn die mittlere Ader die obere unterstützt; auch diese Erscheinung war bei den neuesten Verhältnissen festzustellen (vergl. Seite 36, 5). Ist der zeitliche Unterschied in dem Erreichen des Höchstdruckes der

1) Wie Herr Prof. E. Kaiser (Gießen) für möglich hält, könnte auch der heiße und trockene Sommer 1911 bei dieser Veränderung von Einfluß gewesen sein, zumal auch andere ähnliche Veränderungen an Quellen sich im Jahre 1912 herausgestellt haben.

beiden Adern, der zum Einströmen von Kohlensäure in das Bohrloch die Veranlassung bildet, sehr groß, so muß notwendigerweise der Ausbruch in zwei getrennte Phasen zerfallen (vergl. dazu die Kurven in Figur 9). Je später der mittlere Ausbruch dem oberen nachfolgt, desto schärfer wird die Trennung dieser beiden Phasen sein.

Da aber anderseits die mittlere Ader den bis rund 100 m hinabgehenden Wasserpfropfen nicht mehr zu heben braucht, und nach dieser Hebung jetzt sicher in der Ader bei 218 m ein Überdruck gegenüber der verkürzten Wassersäule besteht, so wird sie natürlich gleich zu Anfang ihrer Tätigkeit sehr stark wirken können. Daraus erklärt sich das unvergleichlich schöne und starke Ansteigen des Wasserstrahles in diesem Augenblicke und das laute Getöse, von dem der Beginn der zweiten Phase begleitet ist.

Es ist nun leicht erklärlich, daß die Kohlensäure, die früher aus der jetzt anscheinend nicht mehr tätigen Ader bei 267 m ausströmte, sich einen anderen Weg zum Bohrloch gebahnt hat. Da es aber eine allgemeine Beobachtung beim Bohren ist, daß schon einige Meter über einer gasführenden Hauptspalte sich stärkere Kohlensäureentwicklung bemerkbar macht, die nur von engeren Nebenspalten, die mit dieser Hauptspalte in Verbindung stehen, herrühren kann, so wird das Gas, wenn die Hauptspalte durch irgend einen Zufluß verschlossen ist, jetzt durch die engeren Nebenspalten beständig in das Bohrloch einströmen. Die Folge davon ist eine verhältnismäßig starke Gasentwicklung aus dem Wasserspiegel in der Zwischenzeit. In der Tat findet man auch in diesem Punkte eine vollständige Bestätigung der Voraussage, insofern, wie auf Seite 35 angegeben ist, an die Stelle der früheren im Durchschnitt schwachen Gasentbindungen aus dem Wasserspiegel jetzt eine ständige starke Kohlensäureentwicklung getreten ist.

Die mutmaßliche Größe des zur Erzeugung eines starken Ausbruches notwendigen Gasansammlungsraumes läßt sich an der Hand der auf Seite 60 gefundenen Beziehung zwischen der ausgeschleuderten Gas- und Wassermenge in ihrer oberen Grenze folgendermaßen bestimmen. Nehmen wir der Einfachheit halber an, die bei rund 220 m Tiefe gelegene Ader könne

rund 25 cbm Wasser an die Oberfläche schleudern, dann müßten also, wieder von der absorbierten Kohlensäure abgesehen, 50 cbm Gas ihre hebende Tätigkeit entfalten. Dann entsteht bei Annahme einer völligen Entleerung des Bohrloches die Frage: welches Gasvolumen gibt in einer Tiefe von 220 m bei einer Druckentlastung von 22 Atm. 50 cbm Gas, gemessen bei Atm. Druck ab? Also:

$$v\,(22 + 1) = (v + 50) \cdot 1$$
$$v = \text{rund } 2{,}3 \text{ cbm.}$$

Der zur Ansammlung des Gases im Gestein notwendige Raum braucht also nur 2,3 cbm groß zu sein bei rund 25 cbm Bohrlochinhalt. Nimmt man weit ungünstigere Verhältnisse an, daß z. B. bei Ende eines Ausbruches nur die oberen 100 m des Bohrloches von Wasser frei seien, während der untere Teil von dem stets seitlich zudringenden Wasser angefüllt bleibe, so ergibt eine ähnliche Rechnung einen notwendigen Gasansammlungsraum von 4,5 cbm, eine Zahl, die immer noch als verhältnismäßig klein angesehen werden muß. Man muß nun bedenken, daß die angewandte, auf Grund der Versuche am Apparat empirisch gefundene Beziehung zwischen der ausgeschleuderten Kohlensäure- und Wassermenge für solche Ausbrüche galt, bei denen das Verhältnis des ausgeschleuderten Strahles zur Länge des Steigrohres fast das gleiche wie beim Namedysprudel war, und daß ferner die auftreibende Tätigkeit der bei einem Ausbruch aus der aufsteigenden Säule entweichenden Kohlensäure bei der Berechnung jener Beziehung gar nicht berücksichtigt wurde. Die oben berechnete Zahl 4,5 cbm stellt also sicherlich eine obere Grenze dar, so daß die Annahme eines von der Gesamtheit aller Spalten gebildeten notwendigen Ansammlungsraumes von rund höchstens 4,5 cbm als nicht zu gering erscheint. Diese Annahme ist aber sicherlich stets gerechtfertigt.

Erwägt man zum Schluß noch einmal die verschiedenen Möglichkeiten, die den Verlauf eines Ausbruches bedingen können, also vor allem die zeitlich verschiedene Tätigkeit der einzelnen Kohlensäureadern, das zeitweilige Aussetzen einer derselben, dann den Einfluß der Verrohrung, so sieht man ein, daß der Versuch, einen Ausbruch auch nur angenähert mathematisch zu beschreiben, auf unüberwindliche Schwierigkeiten

stoßen muß. Einen Punkt möchte ich dabei noch ganz besonders hervorheben. Bestimmt man nämlich aus der Menge des ausgeworfenen Wassers die Tiefe, bis zu der das in dem Bohrloch enthaltene Wasser an einem der alten Ausbrüche teilnimmt, so findet man dafür rund 235 m; es ist nun aber natürlich vollkommen ausgeschlossen, daß all das in größeren Tiefen als 235 m befindliche Wasser — da doch die unterste Ader bei 267 m sitzt — wenigstens bei den alten Erscheinungen überhaupt nicht an einem Ausbruch beteiligt gewesen ist. Da es aber unmöglich ist, festzustellen, wieviel Wasser aus den verschiedenen Tiefen ausgeschleudert, wieviel unter Kohlensäureabgabe hochgehoben wird und dann wieder zurückfällt, so folgt daraus ohne weiteres, daß eine Berechnung der in den verschiedenen Abschnitten des Ausbruches ausgeschleuderten Wasser- und Gasmengen — wie Henrich es getan hat — keinen Anspruch auf Übereinstimmung mit der Wirklichkeit machen kann.

Alles in allem genommen ergibt sich also, daß die neue, ganz allgemeine Theorie über die physikalischen Grundlagen der intermittierenden Sprudel nicht nur die alten Erscheinungen vollkommen zu erklären vermag, sondern gerade durch die neuen die weitgehendste Bestätigung erfährt.

---

§ 13. Experimentelle Darstellung der Theorie. Demonstrations-Apparat eines intermittierenden Sprudels.

Nachdem also der Sprudel durch sein übereinstimmendes Verhalten mit meinem Apparat gezeigt hatte, daß die von diesem wiedergegebenen Verhältnisse mit der Wirklichkeit übereinstimmten, lag mir daran, noch einige Verbesserungen anzubringen. Vor allem versuchte ich noch einmal die Bildung großer Blasen zu vermeiden, die ich auch bei meinem letzten Besuch in Namedy nicht hatte beobachten können, die aber bei dem Apparat für den Verlauf eines Ausbruches von so unangenehmer Bedeutung waren. Nach verschiedenen Mißerfolgen

bewirkte schließlich folgende Anordnung eine einigermaßen befriedigende Lösung; in das 2,5 cm weite und 35 cm lange Ausflußrohr B B″ führte ich ein 0,3 cm weites Eisenrohr von 35 cm Länge unter Korkabdichtung ein, das mit vielen feinen Löchern versehen war. Wenn dann bei einem Ausbruch durch das enge Rohr Gasblasen aufstiegen, so rissen sie aus dem Zwischenraum Wasser mit sich, sodaß der Strahl nie unterbrochen wurde. Dieser enge Ausfluß hatte allerdings einen Übelstand im Gefolge: wenn es nämlich durch geeignete Regulierung erreicht wurde, daß aus beiden Kohlensäurezuführungen Gas gleichzeitig in das Steigrohr trat, so erfuhr das aufsteigende Wasser beim Eindringen in das enge Rohr einen Widerstand, der sich durch die ganze Wassersäule hindurch fortpflanzte und das Gas in der unteren Ader ein Stück zurückdrängte. So kam es, daß ein Ausbruch stets aus zwei Phasen bestand, deren Grenze allerdings meist nicht mehr so scharf war wie früher. Im allgemeinen waren die Verhältnisse jetzt folgende:

Bei einer Zwischenzeit, die je nach der Stärke des Kohlensäurezustromes 10 bis 25 Minuten dauerte, verlief ein Ausbruch in ungefähr einer Minute. Das erste Maximum wurde nach 15—20 Sekunden erreicht und betrug bis 40 cm; dann stieg der Strahl bis etwa 10 cm abwärts, um nach rund 30 Sekunden wieder anzusteigen und eine maximale Höhe von rund 100 cm zu erreichen. Der endgültige Abstieg erfolgte dann meist in 10 Sekunden[1]). Der Wasserspiegel verschwand bis ungefähr 5 m unter der Oberkante im Steigrohr, stieg dann aber innerhalb 2—3 Minuten wieder auf eine dem Wasserstand im Druckgefäß entsprechende Höhe, auf der er sich bis kurz vor dem neuen Ausbruch hielt.

Da mit dieser Anordnung das erreicht zu sein schien, was ohne die Apparatur zu sehr zu komplizieren überhaupt möglich und wünschenswert war, so wurden daher diese Versuche als erledigt betrachtet. Jetzt handelte es sich noch darum, das neue Prinzip der intermittierenden Kohlensäuresprudel durch einen

1) In Fig. 9 (IV) ist ein solcher Ausbruch zum Vergleich mit denen in Namedy beobachteten dargestellt; die Höhen in cm sind um die Hälfte verkleinert; 10 Sekunden entsprechen 1 Minute bei den Ausbrüchen von Namedy.

kleineren, für Demonstrationszwecke geeigneten Apparat übersichtlich darzustellen. Am besten bewährte sich folgende Anordnung (Fig. 5):

Das 1,2 cm weite Steigrohr ist unter Gummiabdichtung mit einem weiten Auffangebecken verbunden; es mißt von der Einführungsstelle der Kohlensäure bis zur Unterkante dieses Beckens 1,4 m, dazu kommen noch 10 cm Aufsatzrohr von gleicher Weite, das oben in eine Spitze ausgezogen ist. Ebenfalls in dies Becken mündet das Druckrohr, das die absteigenden Wasseradern darstellt, und das mit dem Steigrohr durch eine U-förmige Röhre unterhalb der Kohlensäureader verbunden ist. Der die Verbindung dieses Druckrohres mit dem Becken herstellende Gummischlauch kann durch einen Quetschhahn beliebig weit verschlossen werden. Von der Kohlensäurezuführungsstelle führt ein mehrfach schwach gebogenes Glasrohr, das die mehr oder minder verwickelt angeordneten gasführenden Spalten im Gestein darstellen soll, zu einem Gefäß von rund 2 Liter Inhalt[1]), das den in der Wirklichkeit allein von den Spalten gebildeten notwendigen Ansammlungsraum für die Kohlensäure in einfacher Weise ersetzt. In dem Verbindungsrohr dieses Gefäßes mit der von einem Reduzierventil abgedrosselten Kohlensäurebombe befindet sich wieder eine Kapillare K, die einen vollkommen gleichmäßigen Gaszustrom zum Ansammlungsraume bewirkt und die Stelle versinnbildlichen soll, bis zu welcher sich die von einem Ausbruch hervorgerufenen Druckschwankungen in den kohlensäureführenden Spalten noch geltend machen. Läßt man nun Kohlensäure unter einem Druck von 0,2 Atm. in den Apparat einströmen und füllt gleichzeitig das Steig- und Druckrohr soweit mit Wasser, daß es noch einige Centimeter im Auffangebecken steht, so wird, wenn der Druck des Gases groß genug geworden ist, das Wasser langsam aus dem mehrfach gebogenen Glasrohr verdrängt, bis Kohlensäure in das Steigrohr eintritt und einen Ausbruch bewirkt, dessen Dauer und Stärke einmal von dem durch den erwähnten Quetschhahn geregelten Wasserzufluß und anderseits durch den Gaszustrom bedingt ist.

1) Seine Größe ergab sich wieder auf Grund der Beziehung auf Seite 60.

Um nun zu verhindern, daß die bei dem Demonstrationsapparat benutzte Zweiliterflasche den Eindruck erwecken könnte, daß auch bei meiner Theorie ein oder mehrere im Vergleich zum Steigrohr groß erscheinende Hohlräume zur Ansammlung des Gases erforderlich seien, riet mir Herr Professor Richarz, die Flasche durch eine entsprechend lange Glasröhrenleitung zu ersetzen. Ich benutzte dazu ein altes Steigrohr vom großen Apparat von rund 6,5 m Länge und 1,2 cm Durchmesser, also rund 730 ccm Inhalt, und mußte natürlich dementsprechend infolge der auf Seite 60 gefundenen Beziehung ein engeres und etwas kürzeres Steigrohr von 120 cm Länge und 8—9 mm Durchmesser wählen. In dieser Anordnung zeigte der Apparat ebenfalls das Prinzip der Theorie vollkommen einwandfrei.

---

§ 14. Zusammenfassung.

Das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung läßt sich im wesentlichen so zusammenfassen:

I. Der zur Erklärung des Intermittierens von Pictet und Andreae angenommene besonders beschaffene Hohlraum erweist sich als vollkommen unnötig und aus geologischen Gründen als unannehmbar.

II. Die spezielle Theorie des Namedysprudels von F. Henrich ist quantitativ unrichtig, da sie auf unrichtigen Annahmen beruht; aber auch qualitativ vermag das allgemeine Prinzip von der Verdrängung des Wassers durch die nach der Sättigung frei aufsteigende Kohlensäure besonders folgende Erscheinungen nicht zu erklären:

1) die neuerdings aufgetretenen „Zweiphasenausbrüche“; und in Verbindung damit

2) das plötzliche und schnelle Ansteigen des Wasserspiegels kurz vor einem Ausbruch, und

3) die Gasentbindungen aus dem Wasserspiegel in der Zwischenzeit.

III. Die Ursache des Intermittierens beruht einfach darin, daß bei einem Ausbruch mehr Wasser ausgeschleudert wird,

als zur selben Zeit aus dem Gestein dem Bohrloch wieder zufließt. Daraus folgt:

1) Entsprechend der bei einem Ausbruch eintretenden Verkürzung der auflastenden Wassersäule entsteht in den kohlensäureführenden Gesteinsspalten infolge starken Abströmens eine Druckverminderung des Gases;

2) daher preßt die sich erneuernde Wassersäule die Kohlensäure in die Spalten zurück und dringt so lange nach, bis sich der Wasserdruck und Gasdruck das Gleichgewicht halten;

3) der zunehmende Gasdruck überwindet nach und nach den fast konstant bleibenden Wasserdruck und preßt das Wasser zurück in das Bohrloch;

4) das eindringende Gas steigt frei auf, drängt ein entsprechendes Volumen an Wasser nach oben und bringt die Säule zum Ausfluß unter Strahlbildung; dann beginnt wieder 1).

IV. Der Verlauf eines Ausbruches ist bedingt einmal durch die zeitlich und dem Grade nach verschiedene Tätigkeit der einzelnen Kohlensäureadern, anderseits durch die besondere Art der Verrohrung des Bohrloches.

V. Der Barometerstand hat auf die Dauer der Ausbrüche und der Zwischenzeiten keinen Einfluß.

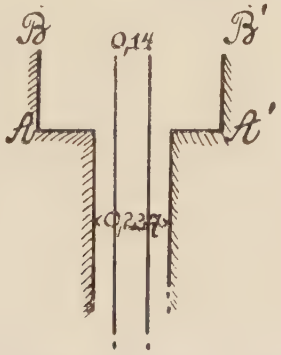
VI. Die Theorie ist durch einen Apparat im allgemeinen und auch in ihren Einzelheiten darstellbar.

VII. Eine mathematische Behandlung der Ausbruchserscheinungen ist unmöglich.

Anhang.

§ 15. Anwendung der neuen Theorie auf andere Sprudel.

In diesem Abschnitt ist der Versuch gemacht, mit Hilfe der neuen Theorie das Verhalten der bekanntesten intermittierenden Kohlensäure- und Kohlenwasserstoffsprudel zu erklären. Entsprechend der manchmal nur recht spärlichen Angaben, die aus der Literatur oder durch Mitteilungen der Besitzer der Quellen zu erhalten waren, können diese Ausführungen natürlich nur ganz allgemeinen Charakter haben.



1. Der intermittierende artesische Springbrunnen des Rank-Herleiner Bades in Oberungarn[1]).

Erbohrt: von Anfang 1870 bis Anfang 1875. Tiefe: 404 m. Verrohrung: Ein Innenrohr, das die Sohle der schachtförmigen Vertiefung am oberen Bohrlochende um rund 1,2 m überragt;

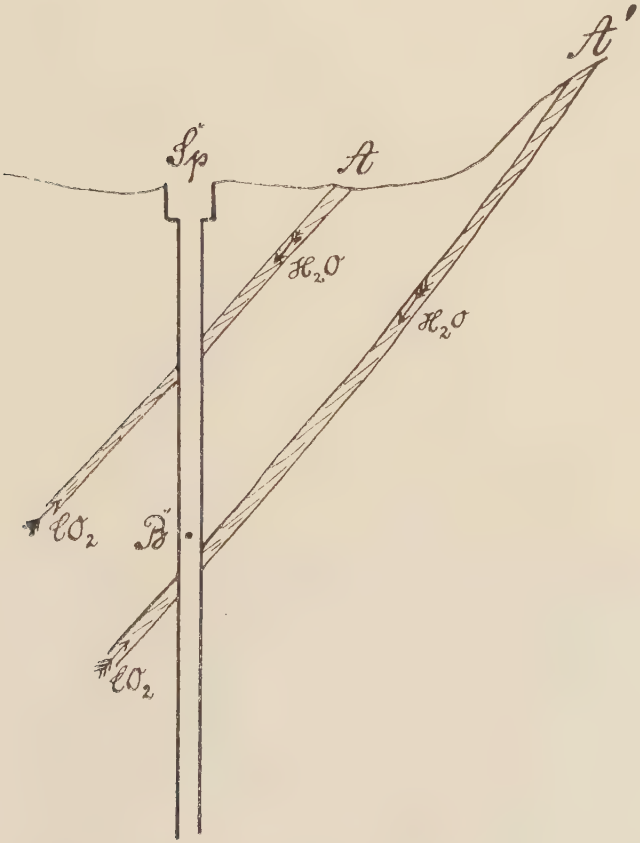
1) Ludmann, Petermanns Mitt. 1877 p. 426 ff.

außerdem ein weiteres Außenrohr. Aus dem von diesen beiden Rohren gebildeten Zwischenraum floß gewöhnlich Wasser aus.

Anfangs sprang der Sprudel mit 1½-stündigen Pausen ungefähr 12 Stunden lang und erreichte dabei Höhen bis zu 10 m. Aber mit der Zeit wurden diese Höhen immer größer bis rund 40 m, dagegen wird die Ausbruchsdauer sehr verringert, bis ungefähr 1 Stunde, und die Pausen nehmen bis zu 17 Stunden zu. Daß solche Erscheinungen während und nach der Bohrung öfters auftreten, ist eine auch von vielen anderen Sprudeln bekannte Tatsache, welche durch die bei der Bohrung notwendig auftretenden Störungen bedingt ist; nach Beendigung der Arbeiten kommt die Entwicklung der Ausbrüche meist zum Stillstand. So war es auch hier, bis sich anscheinend ziemlich unvermittelt ganz neue Verhältnisse ausbildeten. Während nämlich von September 1875 bis zum Juni 1876 der Wasserspiegel im inneren Rohr in der Zwischenzeit nur 1,13 m unter der Oberkante gestanden und aus dem erwähnten Zwischenraum langsames Überfließen in die schachtartige Vertiefung stattgefunden hatte, war er im Oktober 1876 während der Zwischenzeit in 8 m Tiefe sichtbar (vergl. untenstehende Tabelle); auch hatten Zwischenzeit und Ausbruchsdauer abgenommen, gleichzeitig mit einer Temperaturverminderung des ausgeschleuderten Wassers um rund 1,5 Grad C. Die Erklärung dieser letzteren Erscheinungen ist sehr einfach, wenn wir uns der ähnlichen Vorkommnisse beim Namedysprudel entsinnen. Wie dort infolge Versagens der untersten Kohlensäureader die kürzeren

Zeit	Ausbruchsdauer	Vorausgegangene Zwischenzeit	Höhe in m	Wasserstand in m	Temperatur in C
1875 5. IX.	1 St. 13 Min.	17 Stunden	rund 38	rund 1,13	23,75 °
1875 11. IX.	42 Minuten	21 „	37	„	24,00 °
1876 5. VI.	45 „	17 „	—	„	—
1876 6. VI.	35 „	16 St. 20 Min.	38	„	—
1876 8. X.	23 „	—	38,5	rund 8	22,5 °
1876 8. X.	21 „	7 St. 32 Min.	—	„	22,25 °
1876 9. X.	19 „	7 „ 42 „	38,3	„	—
1876 9. X.	20 „	7 „ 48 „	—	„	—

Ausbrüche mit ihren Begleiterscheinungen auftraten, so werden auch hier die Verhältnisse prinzipiell kaum anders liegen. Doch deutet das gleichzeitige Sinken des Wasserspiegels darauf hin, daß sich nicht nur eine Gasader verstopft hat, sondern daß auch in der Wasserzuführung eine Änderung eingetreten sein muß. Wie man diese Verhältnisse vielleicht erklären kann, veranschaulicht die hier folgende Figur.



Sp ist der in dem kesselförmigen Tale von Rank-Herlein gelegene Sprudel, A A' sind zwei durchlässige Schichten oder Spalten, in denen das Wasser sich abwärts, das Gas aufwärts

bewegt. Wenn die untere Schicht A' den gewöhnlichen Wasserstand von 1,13 m unter der Oberkante bedingt, dann ist klar, warum der Wasserspiegel sinken muß, wenn das Bohrloch z. B. an der Stelle B zu Bruch gegangen ist und dadurch der Zustrom zum unteren Teil des Bohrloches abgeschnitten ist.

Ludmann beobachtete am 11. September 1875 folgende Erscheinungen:

Das Wasser im Innenrohr stand anfangs ruhig, 1,13 m unter Steigrohroberkante, wurde dann durch aufsteigende Kohlensäureblasen bewegt, stieg um 3 Uhr 20 Minuten erst langsam, dann schneller und floß nach 10 Minuten über. Darauf erhob sich während weniger Augenblicke der Strahl bis 36,9 m Höhe, stieg aber schon nach einer Minute wieder abwärts. Folgende Höhen wurden beobachtet:

3 Uhr	30 Min.		36,90 m
	32 „		30,28 „
	36 „		21,06 „
	36 „	30 Sek.	24,46 „
	37 „		21,78 „
	40 „		15,95 „
	43 „		14,02 „
	50 „		7,50 „
bis 4 Uhr	09 „		6—7 „
bis 4 „	12 „		1—4 „

dann erfolgte der Schluß des Ausbruches. Das Wasser blieb unter lebhaftem Brausen 2 Minuten unsichtbar, brach dann wieder aus bis zu 6 m Höhe, um nach raschem Fallen noch eine Minute sichtbar zu sein. Nach kurzer Pause stieg der Strahl noch zweimal bis auf 1 m empor, um dann endgültig zu sinken. Unmittelbar nach dem Ausbruch konnte mit einer 57 m langen Leine mit Gewicht der Wasserspiegel nicht erreicht werden; doch stieg er im Anfang der Zwischenzeit meist sehr schnell, später langsamer.

Zu bemerken ist noch, daß ein Ausbruch stets damit begann, daß das Wasser stärker aus dem Zwischenraum floß und nach etwa 15 Minuten heftig emporquoll; nach weiteren 5 Min. hatte dann auch das Wasser im Mittelrohr die Oberkante er-

reicht. Daraus folgt also, daß in das bis in größere Tiefen gehende Mittelrohr das Gas erst später eintritt. Es scheint also auch bei diesem Sprudel der Anstoß zu einem Ausbruch von einer oberen Ader auszugehen; die hierdurch im Bohrloch bewirkte Druckverminderung veranlaßt dann die tiefer liegende, ebenfalls in Tätigkeit zu treten. Zum besseren Vergleich des Verlaufs eines Ausbruches in Namedy und Ránk-Herlein ist je einer in Figur 10 graphisch dargestellt. Alles in allem erscheint die Übereinstimmung mit Namedy so groß, daß sich eine ausführliche Erklärung der einzelnen Erscheinungen erübrigt. Nur sei noch erwähnt, daß die Wasserschüttung den Bohrlochinhalt im Gegensatz zu Namedy mehrfach übertrifft, daß man also einen verhältnismäßig starken Wasserzustrom zum Bohrloch anzunehmen hat. Dieser muß aber nach höchstens einer Stunde erschöpft sein, da der Ausbruch dadurch zu Ende kommt, daß der Wasserspiegel bis in große Tiefen hinabsinkt, während der Gasausbruch noch weiter fortdauert und die vom Namedysprudel her bekannte Erscheinung des Nachausbruches erzeugt.

In allen wesentlichen Punkten herrscht also zwischen den beiden Sprudeln volle Übereinstimmung, sodaß die neue Theorie zur Erklärung vollkommen ausreicht.

2. Der intermittierende Sprudel zu Vichy[1] [2].

Nach dem Bericht von Pictet sind in Vichy in der vulkanischen Auvergne auf der rechten Seite der Allier mehr denn 12 kontinuierliche Quellen, sämtlich in einer Tiefe von 100 bis 110 m erbohrt worden; sie fließen ohne Druck aus. Der einzige intermittierende Sprudel befindet sich auf dem linken Ufer und ist bei 107 m erbohrt, sodaß man also für alle Quellen ein und dieselbe sich fast horizontal erstreckende wasserführende Schicht annehmen muß. Der Sprudel besitzt ein 70 mm weites Steigrohr; es ist also fast dreimal so eng wie das des Namedysprudels. In der Zwischenzeit steht das Wasser 1 bis 2 m unter der Steigrohroberkante; eine halbe Stunde vor dem Ausbruch beginnt es langsam zu steigen und fließt dann zunächst

1) Pictet, Bibl. Universelle et Revue Suisse, 57, 1876, p. 57 ff.
2) Parmentier, Compt. rend., 133, 1901, p. 120.

ruhig über. Nach und nach erscheinen große Gasblasen und machen den Wasserspiegel schaumig, bis ungefähr 4 Minuten nach Beginn des Überfließens, wenn die Gasentbindung schon ziemlich heftig geworden ist, innerhalb 20 bis 25 Sekunden ein 10 bis 12 m hoher Strahl ausgeworfen wird. Das Wasser steigt stoßweise, einige Strahlen gehen hoch, andere tiefer, manchmal sind sogar Unterbrechungen deutlich zu merken. Eine und eine halbe Stunde lang dauert diese Erscheinung, wobei die Höhen langsam bis auf rund 4 m abnehmen; gleichzeitig werden die Unterbrechungen immer länger, bis zu einer Sekunde, und man sieht deutlich, daß nach längeren Zwischenräumen der folgende Strahl sich immer höher erhebt als der vorhergehende. In den letzten 5 Minuten wird das Wasser nur noch 50 bis 80 cm hoch geschleudert, wobei gleichzeitig viel Gas ausströmt; dann schließt der Ausbruch plötzlich mit einem letzten Strahl, worauf auch die Gasentbindung zu Ende ist. Kurze Zeit nachher ist der Wasserspiegel 5—6 m unter dem gewöhnlichen Stande wieder sichtbar. Im allgemeinen dauert die Zwischenzeit 4½ Stunden, ein Ausbruch 1½ Stunden. Die Wasserschüttung wird von Pictet auf 25—30 cbm, von Parmentier auf 18—20 cbm angegeben und übertrifft jedenfalls den Bohrlochinhalt.

Um diese Erscheinungen zu erklären, muß man beachten, daß bei dem verhältnismäßig engen Steigrohr die Bildung großer Blasen, welche den ganzen Querschnitt ausfüllen, ermöglicht ist. Da nun infolge der im Vergleich zum Bohrlochinhalt großen Wasserschüttung mit ziemlich starkem Wasserzufluß zu rechnen ist, kommt den großen Blasen eine viel stärkere auftreibende Wirkung zu, als eigentlich ihrem Volumen entspricht (vergl. S. 45). Man kann sich sehr gut vorstellen, daß in diesem Falle eine einheitliche Gasmenge in Gestalt einer großen Blase beim Aufsteigen eine viel größere Tragfähigkeit für die über ihr befindliche, und eine größere gleichsam saugende Wirkung auf die unter ihr befindliche Wassermenge ausübt, als dieselbe in vereinzelten kleinen Blasen aufsteigende Gasmenge. Ein Ausbruch beginnt wahrscheinlich damit, daß aus der einzigen Kohlensäureader am Grunde des Bohrloches anfangs nur wenig Gas in das Steigrohr eindringt, den Wasser-

spiegel (im Verhältnis zu Namedy und Rank-Herlein) sehr langsam hebt und zum Überlaufen bringt. Sowie aber der Gaszustrom so stark geworden ist, daß sich große Blasen bilden können, muß der Ausbruch ziemlich plötzlich diese großartigen Formen annehmen, wie sie mein Apparat bei Emporkommen großer Blasen ebenfalls wiedergab. Anderseits aber beeinflußt diese Blasenbildung den Ausbruch auch in ungünstiger Weise, indem sie nach dem Maximum die häufigen Unterbrechungen des Strahles bewirkt. Dadurch ist auch die Erscheinung bedingt, daß der Strahl nach einer solchen Unterbrechung, besonders wenn sie länger dauert, höher springt als vorher. Denn so lange noch Strahlbildung vorhanden war, stand die aufsteigende Wassersäule unter dem Druck des gerade ausgeschleuderten Strahles; sowie aber eine große Blase das Steigrohr verläßt, hört dieser Druck zu wirken auf, sodaß die Wassersäule schneller ansteigt und daher beim Wiedererscheinen der Strahl auch größere Höhen erreicht. Auf derselben Ursache beruht endlich auch der plötzliche Abschluß eines Ausbruches mit einem Wasserauswurf ohne nachfolgende größere Gasentbindung. Denn schließlich muß der Kohlensäurezustrom zum Bohrloch so gering werden, daß die Bildung großer Blasen aufhört; die letzte wird die etwa noch nachfolgenden kleinen aufsaugen und beim Erscheinen an der Oberfläche nach Hinausschleudern des letzten auflastenden Wasserpfropfen in die Luft entweichen, ohne daß weitere Wasserschüttung und Gasausströmung erfolgt, da ja jetzt die starke hebende Kraft der großen Blasen fehlt. So ist mit dem letzten Wasserstrahl der Ausbruch zu Ende.

3. Der intermittierende Sprudel von Montrond (Loire)[1][2].

Dieser Sprudel verdient vor allen Dingen deswegen Interesse, weil seine Ausbrüche, wie neuerdings auch beim Namedysprudel, ebenfalls in zwei scharf getrennten Phasen verlaufen. Diese Erscheinung trat bereits während der Bohrung auf, als die Verrohrung noch nicht vollständig war. Und zwar erfolgte

1) Daubrée, Eaux souterraines I p. 368.
2) Laur, Compt. rend. t. 94, 1882, p. 405.

bei einer Bohrlochtiefe von 475 m der erste intermittierende Ausbruch in der Art, daß zunächst aus dem Zwischenraum der beiden äußeren bis 100 m bezw. 180 m hinabgehenden Rohre ein außergewöhnlich starker Ausfluß und schwacher Ausbruch erfolgte. Nachdem dieser zu Ende war und nur noch Gas ausströmte, stieg der Wasserspiegel in dem mittleren bis 473 m hinabgehenden Rohr ziemlich schnell an; es erfolgte zunächst ein langsamer Ausfluß, dann aber bald, wie auch in Namedy und Ránk-Herlein, ein starker Anstieg, sodaß in 10—12 Sekunden bis 35 m Höhe erreicht wurden. Nach 5 Minuten begann der Abstieg des Strahles, der aber erst nach weiteren 15 Minuten im Bohrloch verschwand. Also auch hier wieder liegt entsprechend der äußeren und inneren Verrohrung das Maximum im ersten Viertel der Hauptausbruchszeit.

Diese Erscheinungen änderten sich nicht wesentlich, nachdem die Verrohrung vollendet und ein noch engeres mittleres bis zum Grunde des Bohrloches reichendes Steigrohr von 125 mm Durchmesser eingeführt und die von den anderen Rohren gebildeten Zwischenräume verschlossen waren. Es fand jetzt statt ein Ausbruch von 15 Minuten, eine Ruhepause von 10 Minuten, ein Hauptausbruch von 20 Minuten Dauer.

Leider macht Daubrée keine Angaben über die ausgeworfenen Wasser- und Gasmengen. Als Zwischenzeit gibt Laur[1]) 2 Stunden an. Eine Erklärung dieser Erscheinungen hat Daubrée nicht gegeben; dafür schreibt er: „Le mécanisme des eruptions et des intermittences de Montrond a pu être produit et dirigé experimentalement par divers procédés, dont les résultats ont été notés par M. Laur; mais leur exposition nous entraînerait trop loin"; und an etwas späterer Stelle: „Quant aux intermittences et à la succession de l'eruption centrale à l'eruption annulaire, elle peut se concevoir par l'existence de vides intérieurs formant reservoir". Obwohl nun Laur in den Jahren 1882 bis 1886 dreimal in den Compt. rend. und einmal in den Atti della R. Academia dei Lincei Mitteilungen über diesen Sprudel macht, ist nirgends ein Hinweis auf die im Jahre 1882 der Academie zur Prüfung übergebene Arbeit vorhanden,

1) Laur, Compt. rend. t. 96, 1883, p. 1426.

sonderbarerweise macht auch Daubrée in seinem 1878 erschienenen Buche keine Literaturangabe. Daher war es nicht möglich, diese Schrift zu erhalten. Wie aber auch aus dem letzten angeführteu Satze Daubrées hervorzugehen scheint, beruht die Erklärung auf der Annahme unterirdischer Hohlräume, bietet also anscheinend nichts wesentlich neues.

Der Verlauf des Hauptausbruches bedarf keiner weiteren Erklärung, dagegen kann aus den Angaben Daubrées keine Ursache für das Zustandekommen der Zweiphasenausbrüche gefunden werden. Denn die Annahme verschiedener Kohlensäureadern, wie sie in Namedy mit Sicherheit nachgewiesen sind, ist nach seinen allerdings in diesem Punkte nicht ausreichend erscheinenden Mitteilungen nicht zulässig. Daß aber die Verrohrung die Ursache dieser Zweiphasenausbrüche sei, geht aus seinen Angaben nicht hervor. Bei der Dürftigkeit des vorliegenden Materials erscheint es zwecklos, nach einer einleuchtenden Erklärung dieser Ausbrüche zu suchen, da die Grundlagen dafür fehlen und daher alle Betrachtungen zu sehr den Charakter des Hypothetischen an sich tragen würden.

4. Der „Große Sprudel“ und der „Willibrordus-Sprudel“ zu Bad Neuenahr[1] [2] [3].

Der große Sprudel wurde im Jahre 1861 in einer Tiefe von 89,7 m erbohrt. Nach den Beobachtungen Nöggeraths am 8. Oktober 1862 betrug die Zwischenzeit rund 3 Stunden bei einer Ausbruchsdauer von einer halben bis zu einer Stunde. Durch Anbringung einer engeren Ausflußöffnung, die also eine Entleerung des Bohrloches bei einem Ausbruch verhindert, wurde die intermittierende Quelle in eine kontinuierliche verwandelt. Ebenso ist der Willibrordussprudel, der jetzt beständig ausfließt, von Haus aus eine intermittierende Quelle. „Wenn

1) Nöggerath, Der große intermittierende Wassersprudel zu Bad Neuenahr a. d. Ahr. Poggend. Ann. Bd. 115, 1862, S. 169 ff.

2) Hintz u. Grünhut, Chemische und physik.-chem. Untersuchung des großen Sprudels zu Bad Neuenahr. Wiesbaden 1912.

3) Desgl. des Willibrordus-Sprudels. Wiesbaden 1907.

er ungehemmt ausfließt, steigt er während einer halben Stunde als etwa 20 m hohe Fontäne empor, geht dann zurück und beginnt nach einer Stunde das Spiel von neuem.“ Durch einen aufgesetzten Kupferkessel ist das selbsttätige regelmäßige und andauernde Ausfließen des Sprudels bedingt. Besondere, mit unseren Anschauungen in Widerspruch tretende Erscheinungen wurden nicht beobachtet, sodaß sich eine nähere Erklärung der vorliegenden Verhältnisse von selbst ergibt.

5. Der intermittierende runde Brunnen zu Kissingen[1]).

Der „runde Brunnen im Salinenbadhaus“, 2 km von Kissingen, ist rund 95 m tief. Er steht ganz in Buntsandstein und wird von drei schwachen, z. T. gashaltigen, und einer starken gashaltigen Sole, angetroffen bei 83 m, gespeist. Er springt zeitweise 2 m hoch, im Gegensatz zum Schönbornsprudel in Hausen, der bei 584 m Tiefe ständig einen 4 m hohen Wasserstrahl ausschleudert. Entsprechend der Annahme, daß die Kohlensäure aus dem bei 495 m befindlichen Plattendolomit durch Umsetzung mit Eisenkies entsteht, erklärt Sandberger dieses verschiedene Verhalten der beiden Sprudel folgendermaßen: Die Gase müssen, um vom Erzeugungsorte zum Bohrloch (des runden Brunnens) zu gelangen, noch mächtige Gesteinsschichten durchdringen; dadurch ist es erklärlich, daß die Gase nicht stets gleichmäßig, „ja zeitweise in für den Sprudel unzureichender Menge zuströmen“. „Am Schönborn dagegen steht die tiefe Bohrröhre mit den gasführenden Sichichten in direkter Verbindung und ist daher dessen Gaszufluß ein stets gleichmäßiger“. Damit hat Sandberger ohne Zweifel recht, wenn er die Ursache des Intermittierens in dem verhältnismäßig schwachen Gaszustrom sucht, doch genügt das allein noch nicht, um diese Erscheinung zu Stande zu bringen. Vielmehr muß das Verhältnis des ausgeschleuderten zum seitlich aus dem Gestein zudringenden Wasser, wie wir oben gesehen haben, ganz bestimmten Bedingungen genügen, damit Intermittieren auftritt.

1) Die nachfolgenden Mitteilungen verdanke ich dem Staatl. Chem. Baln. Laboratorium des K. bayrischen Mineralbades Kissingen.

Leider enthält das Bohrprofil der beiden Sprudel keine genauen Angaben über die Abmessungen der Rohre, sodaß sich ein weiterer Vergleich der beiden Sprudel nicht ziehen läßt.

6. Tönisteiner Sprudel, Brohl a. Rhein[1]).

Es handelt sich hier um zwei selbständige intermittierende Quellen. Die ältere ist in einem 300 mm weiten Kupferrohr gefaßt und springt alle 1 bis 1½ Stunden ungefähr 10 Minuten rund 3 m hoch. Wird aber ein engeres Rohr von 50 mm Weite eingesetzt, so schleudert sie den Wasserstrahl ununterbrochen 7—8 m hoch. Die neu erbohrte Quelle ist nicht so stark, sie springt intermittierend aus einem 350er Rohr alle 2—3 Stunden während 5—6 Minuten vielleicht einen Meter hoch; nach einem Ausbruch fällt der Wasserspiegel bis zu 20 m tief in das Bohrloch zurück. Mit einer eingesetzten Fassung von 50 mm Weite arbeitet auch sie ohne Unterbrechung.

Wir finden also auch hier bestätigt was die Theorie verlangt, wie bereits auf Seite 54 erwähnt, daß ein engerer Aufsatz die intermittierende Quelle in eine kontinuierliche verwandelt; ferner ist beim Intermittieren ein Hinabsinken des Wasserspiegels nach einem Ausbruch zu beobachten, was also eine teilweise Entleerung des Bohrloches anzeigt.

7. „Belltal" Moselsprudel[2]).

In Belltal bei Kobern a. d. Mosel ist im Jahre 1905 in außerordentlich hartem Grauwackenschiefer in 30 m Tiefe eine Mineralquelle erbohrt worden. Sie fließt im allgemeinen ziemlich gleichmäßig aus, doch 3—4 mal am Tage wird das Wasser mit gewaltiger Kraft mehrere Meter hoch emporgeschleudert. Wir haben also hier den interessanten Fall, daß das Wasser anstatt in der Zwischenzeit ruhig im Bohrloch zu stehen, ständig ausfließt; doch besteht prinzipiell kein Unterschied gegen die

1) Die folgenden Mitteilungen verdanke ich der Verwaltung des Tönisteiner Sprudels, Dr. C. Kerstiens.

2) Die nachfolgenden Mitteilungen verdanke ich der Belltal Moselsprudel A.-Ges. zu Traben-Trarbach.

gewöhnlichen intermittierenden Quellen. Das Überlaufen geschieht anscheinend unter hydrostatischem Druck. Dadurch wird natürlich der Druck der im Bohrloch stehenden Wassersäule auf die Kohlensäureader in keiner Weise verändert, sodaß der Mechanismus des Intermittierens genau so arbeiten wird, wie bei den übrigen Quellen. Nach einem Ausbruch muß selbstverständlich der Ausfluß eine zeitlang aussetzen, da ja zum Intermittieren eine teilweise Entleerung des Bohrloches erforderlich ist, die allerdings durch die nach dem Ausbruch meist noch stark aufsteigende Kohlensäure infolge ihrer auf die Wassersäule ausgeübten hebenden Kraft verdeckt werden kann.

8. Die Quelle von Ain-Oumach[1]).

Nur der Vollständigkeit halber sei diese intermittierende Quelle erwähnt, obwohl die Angaben in der Literatur nicht ausreichen, um eine nähere Erklärung zu ermöglichen. Sie ist wahrscheinlich in der Nähe von Biscra gelegen und von Jamin besucht und beschrieben worden. Um Mitternacht wirft sie unter Erschütterung des Bodens eine 2 m hohe Wassersäule aus, die bald wieder verschwindet. Um 3 Uhr morgens tritt derselbe Vorgang wieder ein. Zwischen diesen starken Ausbrüchen sollen schwächere, die nur Höhen von 1 m erreichen, häufiger auftreten. Am Tage bemerkte Jamin die starken Ausbrüche nicht. Ob irgend ein Gas seine treibende Kraft hierbei entfaltet, ist nicht angegeben.

9. Der Kane Geysir (Westpennsylvanien)[2]).

Die Quelle liegt in der Ölgegend des westlichen Pennsylvanien im Wilsontal, 6 km südöstlich von Kane. Das Bohrloch ist rund 600 m tief und der ausgeschleuderte Wasserstrahl 30 bis 50 m hoch. Die Zwischenzeit betrug im Sommer 1879 rund 13 Minuten; über die Ausbruchsdauer bestehen keine Angaben.

---

1) Cosmos, Revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des sciences, t. 17, 1860, p. 267.

2) Dana, Manual of Geology III, 1880, p. 753.

Die treibende Kraft sind Kohlenwasserstoffgase. Häufig wird das Gas angezündet und „The antagonistic elements of fire and water are promiscuously blended, at one moment the flame being almost extinguished, but only to burst forth the next instant with increased energy and greater brilliancy". C. A. Ashburner gibt die folgende Erklärung: The water flows into the well on top of the gas until the pressure of the confined gas becomes greater than the weight of the superincumbent water, when an explosion takes place and a column of water and gas is thrown to a great height". Dagegen macht Andreae in der bereits auf Seite 37 angeführten Arbeit mit Recht geltend, daß man ohne weiteres eine periodische Änderung des Gasdruckes nicht annehmen dürfe; und wie er sich diese Änderung verursacht denkt, darüber macht Ashburner keine näheren Angaben. Da Andreae hierfür keine Ursachen finden konnte, stellte er seine Hohlraumtheorie auf, die wir bereits als unnötig erkannt haben. Vielmehr liegt eine Änderung des Gasdruckes wirklich vor, die in einfacher Weise durch die bei einem Ausbruch erfolgte teilweise Entleerung des Bohrloches erzeugt wird. Den Quellenmechanismus hat man sich dann ähnlich wie bei den Kohlensäurequellen so vorzustellen, daß diese Kohlenwasserstoffgase aus den Schichten, in denen sie neben dem Petroleum entstanden sind, auf Spalten emporsteigen und dabei dem absteigenden Wasser begegnen. Dann sind wieder dieselben Verhältnisse gegeben wie bei den intermittierenden Kohlensäurequellen.

Vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Marburg ausgeführt. Meinem hochverehrten Lehrer

Herrn Prof. Dr. F. Richarz

erlaube ich mir auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank auszusprechen für die Anregung zu dieser Arbeit und für seine dauernde liebenswürdige Unterstützung während der Ausführung.

Herrn Privatdozent Dr. E. Take

danke ich hierdurch ebenfalls vielmals für die mir gütigst erteilten Ratschläge.

13. III. 1912.

Lebenslauf.

Am 23. Mai 1889 wurde ich, Emil Altfeld, in Unna i. Westf. als Sohn des Kaufmanns Emil Altfeld geboren. Ich bin evangelischen Bekenntnisses und preußischer Staatsangehöriger. Nach vierjährigem Besuche der Volksschule meiner Vaterstadt trat ich 1899 in die Realschule dortselbst ein und erlangte 1905 den Berechtigungsschein zum einjährig-freiwilligen Dienst. Nach privater Vorbereitung im Lateinischen wurde ich dann Herbst 1905 in die Untersekunda des inzwischen gegründeten Realgymnasiums zu Unna aufgenommen. Ostern 1909 verließ ich diese Anstalt mit dem Zeugnis der Reife, um mich dem Studium der Mathematik und Naturwissenschaften zu widmen. Die ersten 4 Semester war ich in Marburg immatrikuliert, im Sommer 1911 in München und seit dem Winter 1911/12 wieder in Marburg. Das Examen rigorosum bestand ich am 19. Februar 1913. In der folgenden Zeit bereitete ich mich in Marburg für das Staatsexamen vor und war Assistent am Physikalischen Institut der Universität Marburg.

Meine akademischen Lehrer, denen ich zu großem Danke verpflichtet bin, waren

in Marburg: Bauer, Cohen, Feußner, Fries, Hensel, Jenner, Jensen, Kayser, Meisenheimer, Misch, Neumann, Richarz, Schenck, Schulze, Schücking, Schürmann, Take, Wegener, Zincke;

in München: Röntgen, Rothpletz, Sommerfeld, Voß, Wagner.